



**HAL**  
open science

**Etude et modélisation des phénomènes  
d’(inter)dépendances et de défaillances en cascade au  
sein des réseaux techniques urbains : vers une aide à la  
décision pour une application à l’agglomération  
parisienne face à une crue majeure**

Marie Bocquentin

► **To cite this version:**

Marie Bocquentin. Etude et modélisation des phénomènes d’(inter)dépendances et de défaillances en cascade au sein des réseaux techniques urbains : vers une aide à la décision pour une application à l’agglomération parisienne face à une crue majeure. Génie civil. Université Paris-Est, 2020. Français. NNT : 2020PESC2015 . tel-03043747

**HAL Id: tel-03043747**

**<https://theses.hal.science/tel-03043747v1>**

Submitted on 7 Dec 2020

**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.

## Thèse de doctorat

Université Paris-Est et Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris  
Ecole doctorale Ville, Transports et Territoires – Laboratoire Lab'Urba

Discipline : Génie Urbain

Présentée et soutenue par

**Marie BOCQUENTIN**

---

Etude et modélisation des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade au sein des réseaux techniques urbains.

Vers une aide à la décision pour une application à l'agglomération parisienne face à une crue majeure.

---

Thèse soutenue le 25 mai 2020 devant le jury composé de :

**Myriam Merad**, directrice de recherche (HDR), CNRS – *Présidente du jury*

**Corinne Curt**, ingénieure de recherche (HDR), INRAE – *Rapporteuse*

**Franck Guarnieri**, directeur de recherche (HDR), Mines ParisTech - *Rapporteur*

**Chris Zevenbergen**, professeur (équivalent HDR), THU Delft - *Examineur*

**Youssef Diab**, professeur (HDR), Université Gustave Eiffel – *Directeur de thèse*

**Marc Vuillet**, enseignant-chercheur, EIVP - *Encadrant*

**Serge Lhomme**, maître de conférences, Université Paris-Est-Créteil - *Encadrant*

**Jean-Marie Cariolet**, enseignant-chercheur, EIVP - *Invité*



## RESUME

Le fonctionnement des espaces urbains actuels repose sur des services et réseaux techniques toujours plus étendus, complexes, denses et perfectionnés. Ceux-ci, bien que performants et robustes dans leur gestion quotidienne, sont vulnérables aux aléas majeurs et dépendants les uns des autres. Des phénomènes de défaillances en cascade peuvent alors survenir au sein de ces systèmes complexes, que ce soit au niveau technique ou organisationnel. Cette propagation des défaillances d'un système à d'autres se fait par le biais de dépendances et entraîne l'aggravation progressive des impacts de l'événement initial et l'accroissement de la zone impactée, rendant les processus de relèvement plus difficiles et plus lents.

La définition et la caractérisation de ces phénomènes permettent de souligner leur importance, leur complexité, leur criticité, et paradoxalement le manque d'informations qui s'y rapportent. Ces observations nous amènent à considérer l'intérêt de leur étude, que ce soit avant ou après leur survenue, de façon empirique ou via des modèles, dans le but d'aider les parties prenantes à identifier et prévoir des scénarios de cascades, d'envisager des solutions palliatives ou des actions de réduction de la vulnérabilité.

L'état de l'art effectué démontre que les démarches d'étude et de modélisation existantes sont très variées, de par les méthodologies utilisées mais aussi de par l'absence de définitions communes et la diversité des contextes. Une analyse comparative à des fins de sélection et d'application semble en l'état délicate pour un porteur opérationnel potentiel. Nous proposons tout d'abord une caractérisation de ces démarches selon des paramètres susceptibles de correspondre aux critères de choix potentiels. Nous proposons également une typologie plus théorique de ces démarches, complémentaire à la caractérisation des théories de modélisation utilisées dans la littérature.

Face aux défis posés par le processus de mise en œuvre, nous nous penchons sur la question du choix et du développement d'une démarche appropriée pour un contexte donné, dans l'objectif de soutenir les décideurs locaux. Il s'agit alors d'aider le porteur à construire une démarche capable de répondre aux besoins et objectifs des parties prenantes locales malgré leurs contraintes, de fonctionner avec des données potentiellement très diverses et imparfaites, de s'adapter à des résolutions spatio-temporelles et des granularités variables, mais aussi de tirer parti des connaissances acquises par les acteurs locaux et des outils et ressources disponibles. Nous proposons finalement plusieurs profils-types de démarches, caractérisés selon les objectifs poursuivis et le contexte de mise en œuvre.

Une application est ensuite réalisée sur l'agglomération parisienne, où le risque de crue majeure est particulièrement probable et redouté. L'objectif est d'apporter des éléments pour améliorer la prise en compte et la prévision des phénomènes étudiés, par le biais d'une analyse approfondie du contexte, de rencontres avec les parties prenantes et d'une enquête auprès des opérateurs de réseaux. Des propositions sont faites concernant l'établissement de retours d'expérience et les cartographies de vulnérabilité utilisées actuellement. Les besoins prévisibles quant à la mise en œuvre d'une démarche plus substantielle sont également identifiés.

**MOTS-CLÉS :** Réseaux techniques urbains ; Interdépendances ; Défaillances en cascade ; Modélisation ; Agglomération parisienne ; Crue ; Seine.

## ABSTRACT

The functioning of urban areas is based on technical services and networks which are always more expanded, complex, dense and sophisticated. These networks, although efficient and robust in their day-to-day management, are vulnerable to major hazards and dependent on one another. Phenomena of cascading failures can then occur within these complex systems, whether at technical or organizational level. This propagation of system-to-system failures is done through dependencies and leads to the gradual aggravation of the impacts of the initial event and the increase of the impacted area, making recovery processes more difficult and slower.

The definition and characterization of these phenomena underline their importance, their complexity, their criticality, and paradoxically the lack of information related to them. These conclusions lead us to consider the interest of their study, whether before or after their occurrence, empirically or through models, in order to help stakeholders identify and predict cascading scenarios, or to consider palliatives solutions and vulnerability reduction actions.

The state of the art shows that the study and modelling approaches are very varied, due to the methodologies used but also due to the absence of common definitions and the diversity of contexts. A comparative analysis for selection and application purposes seems to be delicate for a potential leading stakeholder. First, we propose a characterization of these approaches according to parameters that may correspond to the choice criteria. We then propose a more theoretical typology of these approaches, complementary to the characterization of the modeling theories used in the literature.

Faced with the challenges posed by the implementation process, we are looking into the question of choosing and developing an appropriate approach for a given context, with the aim of supporting local decision-makers. The aim is to help the leaders to build an approach capable of meeting the needs and objectives of local stakeholders, despite their constraints, to operate with potentially very diverse and imperfect data, to adapt to spatial-temporal resolutions and variable granularities, but also to take advantage of the knowledge acquired by local actors and the tools and resources available. Finally, we propose several standard profiles of approaches, characterized according to the objectives pursued and the context of implementation.

An application is then carried out on the Paris metropolitan area, where the risk of major flooding is particularly likely and feared. The aim is to provide elements to improve the consideration and prediction of interdependencies and cascading failures, through an in-depth context analysis, meetings with stakeholders and a survey of network operators. Proposals are made concerning feedbacks analysis and concerning vulnerability mapping currently used. The foreseeable needs for the implementation of a more substantial approach are also identified.

**KEY WORDS :** Urban technical networks ; Interdependencies ; Cascading failures ; Modelization ; Agglomeration of Paris ; Flood ; Seine river.

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier sincèrement les nombreuses personnes qui ont permis, d'une façon ou d'une autre, l'aboutissement de cette thèse.

Merci à Youssef Diab, mon directeur de thèse, pour m'avoir offert cette opportunité, soutenu dans mes choix et accompagné pendant ces nombreuses années. Merci aux membres du jury d'avoir lu et évalué ce travail de thèse, et d'avoir été présents pour cette soutenance riche de discussions malgré les circonstances particulières.

Merci à Marc Vuillet pour son soutien, sa ténacité, et son intérêt sans faille tout du long. Merci à Jean-Marie Cariolet pour ses réflexions toujours pertinentes, son recul, et sa vision apaisée des choses. Merci à Serge Lhomme pour ses nombreux apports scientifiques et méthodologiques, et ses conseils toujours adéquats.

Merci aux projets de recherche qui ont permis le financement de ces travaux de recherche et à leurs équipes : RESIN, RGC4, RESCCUE. Merci à la direction et au personnel de l'EIVP de m'avoir permis de réaliser cette thèse dans de bonnes conditions, et en particulier Gildas, Benjamin, Annick, Sophie, Hocine, Aurélie, Guillaume, Delphine... Merci aux membres du Lab'Urba et de l'école doctorale VTT, plus particulièrement Sabine pour son soutien logistique tout au long de la thèse, et Caroline et Nathalie pour l'organisation de la soutenance dans ces conditions difficiles.

Merci aux chercheurs avec qui j'ai eu l'occasion de travailler, notamment Mimi, Ester, Laura, Ignasi, Alison, Nathalie, et Clément, pour les échanges enrichissants. Merci à Amélie, Mélanie, Rodolphe et tous mes interlocuteurs au sein des opérateurs de réseaux pour leurs apports, critiques et retours, qu'ils soient scientifiques ou opérationnels. Merci à Thomas, Felipe et Mathilde de m'avoir accompagné pendant leurs quelques mois de stage, avec bonne humeur et bonne volonté !

Merci à Messieurs Mendes et Rodrigues, Piyushimita Thakuriah, Mark Livingston, Fanny et Nico, le documentaire « Paris sous l'eau », les romans catastrophes... de m'avoir donné l'inspiration et l'envie de réaliser cette thèse.

Merci à mes compagnons doctorants Anas, Victor, Laxmi, Romain, et Samuel pour les discussions existentielles entre « cockers en manque d'affection », les partages d'états d'âmes et de memes, les conseils bienvenus, le soutien spirituel, mais aussi tout ce qui suit. Merci à Abboud, Alberto, Antoine, Béatrice, Bilal, Eugenia, Fanny, Fédérica, Glenn, Jeanne, Jenna, Joffrey, Kende, Léa, Marie, Margaux, Margot, Martin, Mathilde, Mimi, Myriam, Pascale, Thomas... pour les pauses café (ou thé !), afterworks, soirées jeux, escapades au RA, pique-niques, prêts littéraires, argumentations hasardeuses, programmations de nos reconversions, citations « coulées dans le bronze »... Merci à Mamou, Fanny, Nico disco, les compotes, Béatrice, Jean-Philippe, Albert, Bart, Nico, Marie, Auguste, Michèle, Lola, Antoine, Miléna, Kajin, Karine, Xavier, Anthony, les Bocq, les Maintigneux, les archers, les marcheurs, les danseurs, Chani, Igloo, Lady Blue pour avoir rendu ces années belles, agréables, drôles, passionnantes, enrichissantes...

Merci à Leeloo et Juju d'être de si belles sestrans, et d'être toujours là. Merci à Papa et Maman pour absolument tout, depuis le début. Rien de tout cela n'aurait été possible sans votre amour et votre soutien. Et un merci supplémentaire à Maman pour la relecture ! Merci enfin à Lucien, avec qui la vie est si jolie depuis plus d'une décennie. Merci pour ton soutien continu et ta confiance absolue. A nous deux désormais d'écrire le prochain chapitre.

Pour conclure ces remerciements, une première citation de circonstance : « Soyons reconnaissants aux personnes qui nous donnent du bonheur, elles sont les charmants jardiniers par qui nos âmes sont fleuries » (Proust, 1896).

Et bien sûr merci à vous, lecteur, de vous plonger dans ce manuscrit !

# TABLE DES MATIERES

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| RESUME.....                   | 2  |
| MOTS-CLES : .....             | 2  |
| ABSTRACT.....                 | 3  |
| KEY WORDS : .....             | 3  |
| REMERCIEMENTS .....           | 4  |
| TABLE DES MATIERES.....       | 6  |
| TABLE DES ILLUSTRATIONS ..... | 12 |
| FIGURES.....                  | 12 |
| TABLEAUX.....                 | 18 |
| INTRODUCTION.....             | 21 |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>PARTIE I - LES DEFAILLANCES EN CASCADE AU SEIN DES RESEAUX TECHNIQUES URBAINS :</b>  |           |
| <b>CONTEXTE, ORIGINES, CARACTERISATION ET ILLUSTRATION .....</b>  | <b>26</b> |
| PREAMBULE DE LA PARTIE I .....  | 27        |
| CHAPITRE 1 : LES RESEAUX TECHNIQUES ET INFRASTRUCTURES CRITIQUES : ENTRE COMPLEXITES, VULNERABILITES ET (INTER)DEPENDANCES..... | 28        |
| 1.1. LES RESEAUX TECHNIQUES URBAINS, TERREAU DES DEFAILLANCES EN CASCADE .....  | 28        |
| 1.1.1. Les réseaux techniques urbains : introduction à des systèmes complexes.....  | 28        |
| 1.1.2. Les réseaux techniques urbains : infrastructures critiques parmi d'autres ?.....   | 32        |
| 1.1.3. Une grande diversité de modes d'organisation et de fonctionnement .....  | 37        |
| 1.1.4. Des systèmes indispensables au fonctionnement de la ville, notamment pendant une crise.....                              | 40        |
| 1.2. DES SYSTEMES EXPOSES AUX ALEAS ET DEPENDANTS LES UNS DES AUTRES.....   | 40        |
| 1.2.1. Vulnérabilité et exposition des réseaux techniques urbains.....  | 41        |
| 1.2.2. Les phénomènes d'(inter)dépendances parmi les réseaux techniques urbains et leurs infrastructures .....                  | 44        |
| 1.2.3. Les dimensions d'analyse des relations d'(inter)dépendance.....  | 48        |
| 1.2.4. Une synthèse des caractéristiques principales des réseaux techniques urbains étudiés .....                               | 51        |
| 1.3. CONCLUSION .....   | 53        |
| CHAPITRE 2 : LES DEFAILLANCES EN CASCADE : DEFINITION ET CARACTERISATION DE PHENOMENES COMPLEXES.....                           | 54        |
| 2.1. LES DEFAILLANCES EN CASCADE .....  | 54        |
| 2.1.1. Une première approche conceptuelle.....  | 54        |
| 2.1.2. De nombreuses définitions pour un phénomène encore flou .....  | 57        |
| 2.1.3. Les défaillances de cause commune et en escalade .....   | 60        |
| 2.2. UNE PREMIERE CARACTERISATION .....   | 60        |
| 2.2.1. Les évolutions actuelles propices à leur apparition .....  | 60        |
| 2.2.2. Des conséquences potentiellement majeures .....  | 61        |
| 2.2.3. Dimensions et échelles à considérer pour leur analyse .....  | 62        |
| 2.3. CONCLUSION .....   | 68        |
| CHAPITRE 3 : ILLUSTRATION PAR L'ANALYSE DE QUELQUES RETOURS D'EXPERIENCE .....  | 69        |
| 1.1. L'ETUDE EMPIRIQUE DES DEFAILLANCES EN CASCADE.....   | 69        |
| 1.1.1. Les objectifs, la méthodologie et les difficultés rencontrées dans le cadre de l'analyse empirique.....                  | 69        |
| 1.1.2. Eléments empiriques recueillis dans la littérature .....   | 70        |
| 1.2. CONSTATS ET ENSEIGNEMENTS DE RETOURS D'EXPERIENCE.....   | 72        |
| 1.2.1. Méthodologie mise en place .....   | 73        |
| 1.2.2. Portfolio de retours d'expérience .....  | 74        |
| 1.2.2.1. Sandy en 2012, New York (USA).....   | 74        |



|          |   |    |
|----------|---|----|
| 1.2.2.2. | Black-out électrique en 2000, Californie (USA) .....            | 77 |
| 1.2.2.3. | Nœud de télécommunications en 2004, Rome (Italie) .....         | 78 |
| 1.2.2.4. | Inondations en 2002, Prague (République Tchèque) .....          | 79 |
| 1.2.2.5. | Séisme et tsunami à la centrale de Fukushima, 2011, Japon ..... | 81 |
| 1.2.3.   | Synthèse des enseignements tirés des cas d'étude .....          | 83 |
| 1.3.     | CONCLUSION .....  | 85 |
|          | CONCLUSION DE LA PARTIE I .....                                 | 86 |

## **PARTIE II - ETUDIER ET MODELISER LES (INTER)DEPENDANCES ET LES DEFAILLANCES EN CASCADE : ETAT DE L'ART, TYPOLOGIE, MISE EN OEUVRE ET AIDE AU CHOIX .....88**

### **PREAMBULE DE LA PARTIE II .....**

### **CHAPITRE 4 : ETAT DE L'ART DES DEMARCHES ET PROPOSITION D'UNE TYPOLOGIE DES APPROCHES..... 91**

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| 4.1.     | JUSTIFICATION, OBJECTIFS ET METHODOLOGIE DE L'ETAT DE L'ART .....  | 91  |
| 4.1.1.   | L'étude des (inter)dépendances et défaillances en cascade au sein des réseaux techniques urbains : enjeux et questionnements ..... | 91  |
| 4.1.2.   | Méthodologie de l'état de l'art des démarches existantes .....   | 93  |
| 4.1.2.1. | Sélection de l'échantillon .....   | 93  |
| 4.1.2.2. | Définition des caractéristiques à analyser .....   | 96  |
| 4.2.     | CARACTERISATION DES INITIATIVES ETUDIEES .....   | 97  |
| 4.2.1.   | Objectifs poursuivis .....   | 97  |
| 4.2.2.   | Acteurs impliqués .....  | 98  |
| 4.2.3.   | Architecture et principe des méthodes utilisées .....  | 100 |
| 4.2.4.   | Objets modélisés .....   | 103 |
| 4.2.5.   | Echelles spatiales et niveaux de granularités .....  | 103 |
| 4.2.6.   | Données utilisées en entrée .....  | 105 |
| 4.2.7.   | Données obtenues en sortie .....   | 107 |
| 4.2.8.   | Aléas pris en compte .....   | 109 |
| 4.2.9.   | Discussion .....   | 110 |
| 4.3.     | LES TAXONOMIES EXISTANTES DANS LA LITTERATURE.....   | 111 |
| 4.4.     | PROPOSITION D'UNE TYPOLOGIE BASEE SUR LES PRINCIPES DESCENDANT ET ASCENDANT.....   | 116 |
| 4.4.1.   | Les paradigmes descendant et ascendant.....  | 116 |
| 4.4.2.   | Proposition d'une typologie .....  | 117 |
| 4.4.3.   | Application de la typologie aux démarches analysées .....  | 123 |
| 4.4.4.   | Discussion .....   | 124 |
| 4.5.     | CONCLUSION .....   | 128 |

### **CHAPITRE 5 : LES DEFIS D'UNE MISE EN OEUVRE OPERATIONNELLE ..... 130**

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| 5.1.     | LA DIFFICILE, MAIS NECESSAIRE, IMPLICATION DES ACTEURS.....              | 130 |
| 5.1.1.   | L'importance de l'implication des différentes parties prenantes .....    | 130 |
| 5.1.2.   | Le contexte français.....  | 132 |
| 5.1.3.   | De nombreuses barrières à surmonter .....                                | 135 |
| 5.1.3.1. | Une réglementation française peu contraignante .....                     | 135 |
| 5.1.3.2. | Les barrières sécuritaires .....   | 136 |
| 5.1.3.3. | Les barrières économiques et concurrentielles .....                      | 136 |
| 5.1.3.4. | Les barrières politiques .....   | 136 |
| 5.1.3.5. | Réussir à impliquer les parties prenantes .....                          | 136 |
| 5.2.     | LES DONNEES : NOMBREUSES, EPARSEES, IMPARFAITES MAIS INDISPENSABLES..... | 138 |
| 5.2.1.   | Les données relatives aux réseaux techniques urbains.....                | 139 |
| 5.2.1.1. | Des données nombreuses .....   | 139 |
| 5.2.1.2. | Des données diverses.....  | 139 |
| 5.2.1.3. | Des données imparfaites.....   | 140 |
| 5.2.1.4. | Des données indisponibles.....   | 140 |
| 5.2.1.5. | Des données dynamiques .....   | 141 |

|   |   |     |
|---|---|-----|
| 5.2.2.  | Les moyens existants pour collecter les données auprès des acteurs .....  | 141 |
| 5.2.2.1.  | Analyse de retours d'expérience .....   | 141 |
| 5.2.2.2.  | Application de l'AMDE pour l'analyse des REX .....  | 143 |
| 5.2.2.3.  | Collecte de données auprès des opérateurs .....   | 150 |
| 5.2.2.4.  | Collecte de données à travers des initiatives communes .....  | 152 |
| 5.3.  | UNE GRANULARITE (ET UNE COMPLEXITE) A ADAPTER AU CONTEXTE ET A L'EHELLE .....   | 156 |
| 5.3.1.  | Le concept de granularité .....   | 156 |
| 5.3.2.  | Le choix de l'échelle spatiale .....  | 160 |
| 5.4.  | CONCLUSION .....  | 162 |
| CHAPITRE 6 : VERS UNE AIDE POUR LE CHOIX D'UNE DEMARCHE ..... |   | 163 |
| 6.1.  | L'ILLUSION D'UNE DEMARCHE « IDEALE » .....  | 163 |
| 6.1.1.  | Les limites des modèles et des simulations .....  | 163 |
| 6.1.2.  | Une problématique complexe et en constante évolution .....  | 164 |
| 6.2.  | LES FACTEURS INFLUANT LE CHOIX D'UNE DEMARCHE .....   | 166 |
| 6.2.1.  | La caractérisation du processus .....   | 166 |
| 6.2.2.  | Identification de déterminants « théoriques » à considérer pour le choix et le développement d'une démarche adéquate .....            | 170 |
| 6.2.2.1.  | Les objectifs « théoriques » poursuivis par les décideurs et l'utilisation souhaitée des résultats .....                              | 170 |
| 6.2.2.2.  | L'échelle de la zone d'étude .....  | 171 |
| 6.2.2.3.  | Les réseaux urbains implantés sur la zone d'étude et leurs caractéristiques .....   | 171 |
| 6.2.3.  | Identification de déterminants « contextuels » pour le développement ou le choix d'une démarche adéquate .....                        | 171 |
| 6.2.3.1.  | Les objectifs « annexes » poursuivis par les décideurs .....  | 172 |
| 6.2.3.2.  | La motivation et l'implication des parties prenantes .....  | 172 |
| 6.2.3.3.  | Le niveau de connaissances mobilisables et les données disponibles .....  | 172 |
| 6.2.3.4.  | Les ressources disponibles .....  | 173 |
| 6.3.  | GARANTIR L'ADEQUATION D'UNE DEMARCHE A SON CONTEXTE .....   | 173 |
| 6.3.1.  | Déterminer les contours d'une démarche dans un contexte donné .....   | 173 |
| 6.3.2.  | L'identification de profils-types .....   | 177 |
| 6.3.2.1.  | Spécification des approches ascendante, descendante et fédératrice .....  | 177 |
| 6.3.2.2.  | Identification de profils-types de démarches .....  | 178 |
|   | Profil 1 : Réaliser un diagnostic global des réseaux techniques urbains, identifier de nouvelles (inter)dépendances. ....             | 180 |
|   | Profil 2 : Identifier les nœuds critiques d'un réseau. ....   | 181 |
|   | Profil 3 : Formaliser des scénarios potentiels de défaillances en cascade. ....   | 182 |
|   | Profil 4 : Identifier des zones géographiques sensibles et vulnérables à un événement initiateur donné. ....                          | 183 |
|   | Profil 5 : Prévoir les dommages potentiels d'un événement initiateur donné. ....  | 184 |
|   | Profil 6 : Prévoir les évolutions en gestion de crise, identifier les infrastructures à surveiller au sein de multiples réseaux. .... | 185 |
|   | Profil 7 : Prioriser des mesures techniques et des solutions palliatives au sein d'un réseau donné. ....                              | 186 |
| 6.4.  | CONCLUSION .....  | 187 |
| CONCLUSION DE LA PARTIE II .....                              |   | 188 |

**PARTIE III - LES RESEAUX DE L'AGGLOMERATION PARISIENNE FACE A UNE CRUE MAJEURE : ENJEUX, DIAGNOSTIC ET PROPOSITIONS .....**

|  |     |
|--|-----|
| PREAMBULE DE LA PARTIE III .....   | 190 |
| CHAPITRE 7 : L'AGGLOMERATION PARISIENNE FACE AU RISQUE DE CRUE MAJEURE ..... | 191 |
| 7.1. UN TERRITOIRE VULNERABLE AU RISQUE DE CRUE MAJEURE .....                | 191 |
| 7.1.1. Délimitation de la zone d'étude : l'agglomération parisienne .....    | 191 |

|  |     |
|--|-----|
| 7.1.2. L'aléa inondation et les scénarios de crues .....   | 192 |
| 7.1.3. La réglementation relative à l'aléa inondation : des initiatives encore basées sur le volontariat   | 196 |
| 7.2. UN TERRITOIRE COMPLEXE : IDENTIFICATION DES ACTEURS ET RESEAUX .....  | 198 |
| 7.2.1. De nombreuses parties prenantes .....   | 198 |
| 7.2.1.1. Les représentants de l'Etat .....   | 201 |
| 7.2.1.2. Les collectivités .....   | 202 |
| 7.2.1.3. Les opérateurs .....  | 203 |
| 7.2.2. Des réseaux techniques urbains nombreux et divers.....  | 204 |
| 7.1.5. Un territoire vulnérable au risque de crue par le biais de ses réseaux.....   | 205 |
| 7.3. CONCLUSION .....  | 207 |
| CHAPITRE 8 : POSSIBILITES POUR L'ETUDE DES PHENOMENES D'(INTER)DEPENDANCES ET DEFAILLANCES EN<br>CASCADE .....   | 209 |
| 8.1. PRESENTATION DE LA METHODOLOGIE APPLIQUEE .....   | 209 |
| 8.1.1. Collecte d'informations.....  | 209 |
| 8.1.1.1. Analyse bibliographique .....   | 209 |
| 8.1.1.2. Enquête auprès des gestionnaires de réseaux .....   | 210 |
| 8.1.1.3. Observations et entretiens informels .....  | 211 |
| 8.1.2. Application de la grille d'analyse.....   | 212 |
| 8.2. DES RESEAUX TECHNIQUES URBAINS DIVERS, CRITIQUES, VULNERABLES ET (INTER)DEPENDANTS .  | 213 |
| 8.2.1. Le réseau d'eau potable.....  | 213 |
| 8.2.1. Le réseau d'assainissement.....   | 214 |
| 8.2.3. Le réseau de gestion des déchets .....  | 216 |
| 8.2.4. Le réseau de gaz.....   | 217 |
| 8.2.5. Le réseau d'électricité .....   | 219 |
| 8.2.6. Le réseau d'hydrocarbures.....  | 220 |
| 8.2.7. Le réseau de fluides calorifiques.....  | 221 |
| Réseau de chaud .....  | 222 |
| Réseau de froid .....  | 223 |
| 8.2.8. Le réseau de télécommunications .....   | 223 |
| 8.2.9. La voirie.....  | 225 |
| Paris.....   | 225 |
| Reste de l'agglomération .....   | 225 |
| 8.2.10. Les transports ferrés .....  | 226 |
| 8.3. LA GESTION DES (INTER)DEPENDANCES ET DEFAILLANCES EN CASCADE : UNE VISION D'ENSEMBLE  | 228 |
| 8.3.1. La considération de la problématique des défaillances en cascade.....   | 228 |
| 8.3.2. Bilan des connaissances et des données disponibles concernant les vulnérabilités et<br>(inter)dépendances au niveau des réseaux techniques urbains..... | 231 |
| 8.3.3. Actions mises en place et outils utilisés .....   | 235 |
| 8.3.3. Echanges d'informations.....  | 237 |
| 8.3.4. Les initiatives passées et actuelles .....  | 240 |
| 8.3.4.1. Analyse bottom-up des (inter)dépendances des services urbains parisiens.....  | 240 |
| 8.3.4.2. Une cartographie temporelle combinée des dysfonctionnements prévus par les<br>gestionnaires de la petite couronne.....                                | 243 |
| 8.3.4.3. Les outils et approches des opérateurs .....  | 244 |
| 8.3.4.4. Les cartographies de vulnérabilités .....   | 245 |
| 8.3.4.5. Autres initiatives .....  | 246 |
| 8.4. BILAN DE LA SITUATION .....   | 247 |
| 8.5. CONCLUSION .....  | 249 |
| CHAPITRE 9 : PROPOSITIONS ET REFLEXIONS POUR ALLER PLUS LOIN.....  | 250 |
| 9.1. IDENTIFICATION DES APPROCHES ENVISAGEABLES.....   | 250 |
| 9.1.1. Les approches théoriquement envisageables .....   | 250 |

|   |                |
|---|----------------|
| 9.1.3. Le besoin de leadership .....  | 251            |
| 9.1.2. Les approches basées sur le contexte opérationnel .....  | 252            |
| 9.2. ETUDE DES PHENOMENES PAR L'ANALYSE DE REX .....  | 254            |
| 9.2.1. Méthodologie proposée .....  | 254            |
| 9.2.1.1. Collecte des informations .....  | 254            |
| 9.2.1.3. Analyse des défaillances des réseaux techniques et des défaillances en cascade engendrées .....                | 254            |
| 9.2.1.4. Application de l'AMDE .....  | 255            |
| 9.2.2. Résultats obtenus.....   | 255            |
| 9.2.2.1. La crue de juin 2016.....  | 255            |
| 9.2.2.2. La crue de janvier et février 2018 .....   | 260            |
| 9.2.4. Enseignements et comparaisons .....  | 270            |
| 9.3. LE COUPLAGE DE CARTOGRAPHIES SECTORIELLES .....  | 270            |
| 9.3.1. Les limites actuelles .....  | 271            |
| 9.3.1.1. Des incohérences dans la notion de vulnérabilité .....   | 272            |
| 9.3.1.2. Une diversité de méthodologies pour le calcul des zones de « vulnérabilité ».....                              | 273            |
| 9.3.1.3. Une hétérogénéité des données mises à contribution et des formats de représentation des résultats obtenus..... | 274            |
| 9.3.1.5. De nombreuses incertitudes.....  | 277            |
| 9.3.1.6. Bilan des sources d'incohérence .....  | 278            |
| 9.3.2. Proposition d'un protocole commun .....  | 279            |
| 9.3.2.1. Mise en œuvre d'un diagnostic systématique.....  | 279            |
| 9.3.2.2. Définition d'un cadre partagé.....   | 279            |
| Une définition commune de la notion de fragilité .....  | 280            |
| Un cadre de construction des cartographies .....  | 280            |
| Un processus itératif d'échange et de mise à jour .....   | 281            |
| 9.3.2.3. Retours opérationnels .....  | 283            |
| 9.4. LA CONSTRUCTION D'INDICES COMMUNAUX .....  | 283            |
| 9.4.1. L'intérêt de l'échelon municipal .....   | 283            |
| 9.4.2. La méthodologie proposée.....  | 284            |
| 9.4.3. Illustration de la méthodologie avec le réseau de distribution électrique .....                                  | 287            |
| 9.4.4. Résultats obtenus et utilisations possibles.....   | 288            |
| 9.4.5. Les limites et difficultés relatives à la construction des indices .....   | 293            |
| 9.5. CONCLUSION .....   | 293            |
| CONCLUSION DE LA PARTIE III .....   | 295            |
| CONCLUSION GENERALE .....   | 296            |
| Rappel de la problématique .....  | 296            |
| Synthèse de la démarche.....  | 296            |
| Limites du travail accompli et perspectives pour la poursuite des recherches.....                                       | 297            |
| <br><b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>  | <br><b>300</b> |
| <br><b>ANNEXES .....</b>  | <br><b>323</b> |
| 2. PORTRAITS DE NEUF DEMARCHES REPRESENTATIVES .....  | 324            |
| 1.1. Casceff.....   | 324            |
| 1.2. CIPMA .....  | 328            |
| 1.3. CISIA / CISIPro .....  | 333            |
| 1.4. Domino .....   | 337            |
| 1.5. Hazur.....   | 342            |
| 1.6. Resilis .....  | 346            |
| 1.7. RESCCUE.....   | 349            |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 1.8. | DIESIS .....                             | 353 |
| 1.9. | NISAC .....                              | 357 |
| 2.   | RETOUR SUR LA CRUE DE JANVIER 1910 ..... | 361 |
| 3.   | QUESTIONNAIRE PRINCIPAL .....            | 365 |
| 4.   | QUESTIONNAIRE ANNEXE.....                | 367 |

# TABLE DES ILLUSTRATIONS

## FIGURES

|   |    |
|---|----|
| Figure 1 : Services et réseaux urbains génériques identifiés, selon le type d'objets qu'ils transportent .....  | 31 |
| Figure 2 : Réseaux et sous-réseaux génériques identifiés, pour l'exemple du service « Eau » .....   | 31 |
| Figure 3 : Composants génériques identifiés, pour l'exemple des sous-réseaux du réseau « Eau potable » .....  | 31 |
| Figure 4 : Répartition des OIV selon les secteurs (SAIV). Source des données : (SGDSN, 2016).....   | 36 |
| Figure 5 : La diversité de l'organisation des flux au sein des réseaux techniques, repris de (MEDD, 2005).....  | 37 |
| Figure 6 : Représentation schématique des topologies des réseaux techniques urbains. ....   | 39 |
| Figure 7 : Les différentes catégories d'analyse de la vulnérabilité d'un système, adapté des écrits de (D'Ercole & Metzger, 2009). ....   | 42 |
| Figure 8 : Illustration du concept de "risques réseaux". Source : (Lhomme, 2012) .....  | 44 |
| Figure 9 : Illustration des liens de dépendance et d'interdépendance entre deux systèmes.....   | 44 |
| Figure 10 : Exemples de dépendances entre trois systèmes .....  | 47 |
| Figure 11 : Identification des liens de dépendances entre le transport et les autres services. Source : (Fotouhi et al., 2017).....   | 48 |
| Figure 12 : Illustration de la notion d'ordre de dépendance. ....   | 49 |
| Figure 13 : Les différents états d'un système face à une perturbation.....  | 50 |
| Figure 14 : Les différentes dimensions du processus d'analyse des phénomènes de dépendances entre infrastructures et réseaux. Source : adapté à partir de (Luijff et al., 2008; Perrow, 2011; Rinaldi et al., 2001; Rozel, 2009).....                           | 50 |
| Figure 15: L'évolution logique et temporelle des états de 3 systèmes génériques S1, S2 et S3, traduisant la propagation de la défaillance d'un système à un autre par le biais de dépendances, à la suite d'une perturbation. ....                              | 55 |
| Figure 16 : La propagation linéaire des impacts des dégâts occasionnés par l'événement E1 sur le système S1, puis sur le système S5 dépendant du système S1.....  | 56 |
| Figure 17 : La propagation non linéaire des impacts occasionnés par les dégâts de l'événement E2 sur le système S6, puis sur le système S4 dépendant du système S6, en parallèle des dégâts occasionnés par l'événement E2 sur le système S4. ....              | 56 |
| Figure 18 : La propagation arborescente des impacts occasionnés par les dégâts combinés des événements E1 et E2 sur les systèmes S1 et S3, qui entraîne des impacts sur le système S5 dépendant à la fois de S1 et de S3. ....                                  | 57 |
| Figure 19 : Les théories de la complexité chez les géographes. Source : (Dauphiné, 2003).....   | 63 |
| Figure 20 : Les services urbains à l'interface des approches territoriales, techniques et socio-organisationnelles. ....  | 63 |
| Figure 21 : L'analyse des phénomènes d'(inter)dépendances et défaillances en cascade au sein des réseaux techniques urbains : des dimensions et « échelles » interdépendantes à considérer.....   | 65 |
| Figure 22 : La prise en compte de l'emboîtement des échelles spatiales pour l'analyse de la résilience. Source : (Toubin, 2014) .....   | 66 |
| Figure 23 : Illustration de l'« effet de zoom » lorsqu'on limite la zone géographique prise en compte, en partant de l'échelle nationale pour arriver à l'échelle locale.....   | 67 |
| Figure 24 : Les différents niveaux de décomposition du système urbain composé des réseaux techniques urbains. ....  | 68 |
| Figure 25 : Défaillances en cascade au sein de différents secteurs (pourcentage par rapport au total des événements). Source : (Luijff et al., 2010).....   | 70 |
| Figure 26 : Evènements catégorisés selon les secteurs initiateurs et les secteurs affectés (pourcentage des événements). Source : (Luijff et al., 2010).....  | 71 |
| Figure 27 : Défaillances au sein d'infrastructures interdépendantes ("infrastructure failure interdependencies") et leurs conséquences lors du blackout électrique au Canada et dans le Nord-Est des Etats-Unis en 2003. Source : (McDaniels et al., 2007)..... | 72 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure 28: Séquences d'événements d'une chaîne de défaillances lors du passage de l'ouragan Sandy à New York (Etats-Unis) en 2012. ....  | 76  |
| Figure 29 : Séquences d'événements d'une chaîne de défaillances lors du blackout électrique survenu en Californie (Etats-Unis) en 2000.....  | 77  |
| Figure 30 : Séquence d'événements d'une chaîne de défaillances lors du blackout des télécommunications survenu à Rome (Italie) en 2004. ....   | 78  |
| Figure 31 : Séquence d'événements d'une chaîne de défaillances lors des crues survenues autour de Prague (République Tchèque) en 2002. ....  | 80  |
| Figure 32 : Séquence d'événements d'une chaîne de défaillances lors du séisme ayant touché le Japon en 2011. ....  | 82  |
| Figure 33 : Représentation schématique d'une démarche d'étude et de modélisation des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade au sein des réseaux techniques urbains. ....  | 96  |
| Figure 34 : Utilisation collaborative de l'outil Circle. Source : ( <a href="https://www.deltares.nl/en/software/circle-critical-infrastructures-relations-and-consequences-for-life-and-environment-2/">https://www.deltares.nl/en/software/circle-critical-infrastructures-relations-and-consequences-for-life-and-environment-2/</a> )..... | 98  |
| Figure 35 : Comparaison des effets de deux stratégies d'atténuation différentes pour un scénario donné. Source : (Faist & Junntila, 2017).....   | 98  |
| Figure 36 : Positionnement des organisations en charge des démarches étudiées selon leurs objectifs. ....  | 99  |
| Figure 37 : Structure de la base de données utilisées au sein de Domino. Source : (Pellet, 2009). ....   | 100 |
| Figure 38 : Illustration du fonctionnement de la démarche DR-NEP basée utilisant l'outil I2Sim ainsi que d'autres simulateurs sectoriels. Source : (Alsubaie et al., 2013).....  | 101 |
| Figure 39 : Principe de fonctionnement d'une démarche complexe, composée de différents modules permettant de passer de la collecte des savoirs des parties prenantes à la simulation des impacts des défaillances en cascade. Source : (Tofani et al., 2017).....  | 102 |
| Figure 40 : Couplage de plusieurs simulateurs sectoriels pour la modélisation de certains réseaux et de certains aléas, grâce à des modules de mise en cohérence. Source : (Tofani et al., 2017). ....   | 102 |
| Figure 41 : Modèle simplifié d'un réseau routier et de son alimentation électrique. Source : (Fotouhi et al., 2017). ....  | 103 |
| Figure 42 : Les périmètres géographiques considérés pour différentes implémentations de l'outil Hazur dans le projet RESCCUE. ....   | 104 |
| Figure 43 : Comparaison des facteurs d'échelle et de granularité pour les approches étudiées. ....   | 105 |
| Figure 44 : Grille d'évaluation de la dépendance aux différentes ressources pour un système donné. Source : (Toubin, 2014). ....   | 105 |
| Figure 45 : Bibliothèque de courbes de fragilité construite dans le cadre de l'initiative Syner-G. Source : (Pitilakis et al., 2014).....  | 106 |
| Figure 46 : Coefficients de réaction pour différents matériaux selon les aléas. Source : (NSW Government, 2018). ....  | 107 |
| Figure 47 : Représentation temporelle de l'évolution des dysfonctionnements à la suite de la défaillance d'une ressource. Source : (Robert, Morabito, Cloutier, & Hémond, 2012).....   | 108 |
| Figure 48 : Comparaison des pourcentages de personnes évacuées selon le temps, pour différents scénarios d'actions simulées. Source : (Bram et al., 2016). ....  | 108 |
| Figure 49 : Capture d'écran de la cartographie du périmètre d'impact construite pour un scénario donné. Source : (Predict Consortium, 2016). ....  | 109 |
| Figure 50 : Taxinomie des approches de modélisation des dépendances. Source: (Setola, 2010).....   | 112 |
| Figure 51 : Typologie des approches proposée par Ouyang (2014). Source : (Ouyang, 2014). ....  | 112 |
| Figure 52 : Les paradigmes descendant et ascendant identifiés pour le développement d'indicateurs de durabilité aux échelles locales. Source : (Reed et al., 2006).....  | 116 |
| Figure 53 : Construction d'une approche descendante. ....  | 117 |
| Figure 54 : Architecture de l'approche CIPMA. Source : (Scott, 2007) ....  | 118 |
| Figure 55 : Construction d'une approche ascendante. ....   | 119 |
| Figure 56 : Matrice de formalisation des dépendances entre les services ou infrastructures. Source : (Hilly et al., 2018). ....  | 119 |
| Figure 57 : Construction d'une approche fédératrice. ....  | 120 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure 58 : Capture d'écran de l'interface graphique du module électricité de l'outil PSS Sincal. Source : <a href="https://new.siemens.com/global/en/products/energy/services/transmission-distribution-smart-grid/consulting-and-planning/pss-software/pss-sincal.html">https://new.siemens.com/global/en/products/energy/services/transmission-distribution-smart-grid/consulting-and-planning/pss-software/pss-sincal.html</a> . ..... | 121 |
| Figure 59 : Schématisation du fonctionnement de DIESIS et de ses composants. Source : (Rome et al., 2009). .....   | 122 |
| Figure 60 : Représentation des différentes dimensions de la résilience, illustrées par des exemples. Source : (Curt & Tacnet, 2018). .....   | 125 |
| Figure 61 : Comparaison des préceptes analytiques et systémiques, complété à partir de (Beraud, 2013; Le Moigne, 1974). .....  | 126 |
| Figure 62 : Les (inter)dépendances telles que considérées dans l'approche habituelle, au niveau de l'infrastructure d'un côté et au niveau du composant de l'autre. Source : adapté de (De Porcellinis, Panzieri, & Setola, 2009). .....   | 127 |
| Figure 63 : Les (inter)dépendances telles que considérées au sein de l'approche réductionniste holistique mixte, au niveau des composants, des infrastructures et entre les deux niveaux. Source : adapté de (De Porcellinis, Panzieri, & Setola, 2009). .....   | 127 |
| Figure 64 : Structure proposée pour une approche mixte holistique et réductionniste, composée de trois couches en interaction. Source : (Panzieri, 2012). .....  | 128 |
| Figure 65 : Echelle des acteurs de la participation à la collaboration. Source : (Toubin, 2014). .....   | 131 |
| Figure 66 : Des réseaux (inter)dépendants et des acteurs nombreux et déconnectés (Toubin et al, 2012) .....  | 132 |
| Figure 67 : Modèle conceptuel de collaboration entre le secteur privé et le secteur public pour renforcer la résilience des communautés. Source : (Council et al., 2011). .....  | 137 |
| Figure 68 : Les REX, un processus d'amélioration continue. Source : (Lhomme, 2012) .....   | 142 |
| Figure 69 : Illustration de la démarche d'analyse des REX. Source : (Daniel, 2017b). .....   | 142 |
| Figure 70 : Schéma de l'approche envisagée. Source : (Bocquentin et al., 2018). .....  | 145 |
| Figure 71 : Les pompes de la station d'épuration de Bay Park, à East Rockaway dans le comté de Naussau, ont dû être remplacées après avoir été inondée durant la tempête. Source : (Schwartz, 2013). .....   | 146 |
| Figure 72: Portrait sectoriel du système RATP ferré face à un risque d'inondation modéré. Source : (Toubin, 2014). .....   | 150 |
| Figure 73 : Questionnaires utilisés pour décrire une entité / infrastructure dans l'outil CISIA. Source : (Stefano Panzieri, 2012) .....   | 151 |
| Figure 74 : Les modules de la simulation proposée par l'outil OpenTrack. Source : (IVT, 2017). .....   | 151 |
| Figure 75 : Les modules existants pour l'outil de simulation PSS®SINCAL. Source : <a href="https://new.siemens.com">https://new.siemens.com</a> . .....  | 152 |
| Figure 76 : Schéma des enchaînements entre les effets cascade internes pour un réseau, la construction de zones d'impacts, et les effets cascades externes pour d'autres réseaux. Source : (Grangeat, 2017). .....   | 152 |
| Figure 77: Représentation graphique des relations de dépendances au sein des réseaux urbains par l'outil Circle. (Deltares, 2018) .....  | 153 |
| Figure 78 : Fonctionnement de la plateforme d'échanges d'informations Alfresco. ....   | 154 |
| Figure 79 : Les différents niveaux de décomposition du système complexe composé des réseaux techniques urbains. ....   | 156 |
| Figure 80 : Illustration de la diversité des périmètres d'analyse potentiels pour l'analyse et la modélisation d'un système. ....  | 159 |
| Figure 81 : Les différents niveaux d'analyse des (inter)dépendances et défaillances en cascade. ....   | 160 |
| Figure 82 : Comparaison des objectifs et des données. Source : (Grangeat, 2017). .....   | 160 |
| Figure 83 : Illustration de l' « effet de zoom » lorsqu'on limite la zone géographique prise en compte, en partant de l'échelle nationale pour arriver à l'échelle locale. ....  | 161 |
| Figure 84 : Un équilibre fragile entre les bénéfices attendus et les difficultés. ....   | 166 |
| Figure 85 : Caractérisation du processus d'analyse et de modélisation des phénomènes d'(inter)dépendances et défaillances en cascade au sein des réseaux techniques urbains. ....  | 169 |
| Figure 86 : Stratégies de sélection des systèmes à modéliser. ....   | 175 |
| Figure 87 : Diminution du périmètre géographique ou du type et du nombre de systèmes à modéliser. ....   | 176 |
| Figure 88 : Illustration de la diversité des périmètres d'analyse possibles. ....  | 176 |
| Figure 89 : Périmètres des communes membres de la Métropole du Grand Paris, du Forum métropolitain du Grand Paris et de l'agglomération parisienne. Source : (APUR, 2017). .....   | 192 |



|  |     |
|--|-----|
| Figure 90 : Les limites du bassin Seine-Normandie. Source : <a href="https://episeine.fr">https://episeine.fr</a> .....  | 193 |
| Figure 91 : Les hauteurs des crues reconstituées à la station Austerlitz entre 1640 et 2013. Source : (Seine Grands Lacs, 2019).....   | 193 |
| Figure 92 : Cartographie des Zones d'Inondation Potentielle pour les scénarios R0.5 à R1.15 au niveau du 15 <sup>ème</sup> arrondissement de Paris, à partir de données de la DRIEE. ....  | 194 |
| Figure 93 : Carte des zones potentielles d'inondations par remontée de nappe. Source : <a href="http://www.georisques.gouv.fr">http://www.georisques.gouv.fr</a> .....   | 195 |
| Figure 94 : Evolution temporelle des actions relatives à la gestion du risque inondation. Source : (MEDDE, n.d.) .....   | 197 |
| Figure 95 : Le périmètre du TRI de la métropole francilienne. Source : (DRIEE IDF, 2017) .....   | 197 |
| Figure 96 : Représentation schématique non exhaustive de la diversité des parties prenantes concernant la problématique des réseaux (inter)dépendants, et des relations qu'ils entretiennent. ....   | 200 |
| Figure 97 : Représentation cartographique non exhaustive des périmètres de différents acteurs du service de l'alimentation en eau potable en agglomération parisienne. ....  | 201 |
| Figure 98 : Coupe simplifiée du sous-sol parisien situé dans la plaine alluviale. Source : (Veyret & Laganier, 2013). ....   | 204 |
| Figure 99 : Les périmètres d'action des opérateurs rencontrés. Source : adapté et complété de (Richardot, 2016) d'après (Toubin, 2014). ....   | 205 |
| Figure 100 : Estimation du nombre de personnes en zone inondable selon les scénarios de crue en Ile-de-France. Source : (Fujiki, 2017). ....   | 206 |
| Figure 101 : Impacts potentiels d'une crue majeure centennale sur les réseaux ferrés et routiers en Ile-de-France. Source : Cartographie réalisée par l'IAU IdF pour (OCDE,2014). ....   | 206 |
| Figure 102 : Les principaux liens de dépendances entrantes et sortantes du réseau de distribution d'eau potable. ....  | 214 |
| Figure 103 : Carte du réseau d'assainissement du SIAAP. Source : <a href="http://www.siaap.fr">www.siaap.fr</a> .....  | 214 |
| Figure 104 : Les principaux liens de dépendances entrantes et sortantes du réseau d'assainissement. ....   | 215 |
| Figure 105 : Carte des installations du Syctom et de son périmètre d'action. Source : <a href="http://www.syctom.fr">www.syctom.fr</a> .....   | 216 |
| Figure 106 : Les principaux liens de dépendances entrantes et sortantes du réseau de gestion des déchets... ..   | 217 |
| Figure 107 : Les principaux liens de dépendances entrantes et sortantes du réseau de distribution de gaz.... ..  | 218 |
| Figure 108 : Structure du réseau RTE pour l'alimentation en électricité de l'agglomération parisienne. Source : (RTE, 2019). ....  | 219 |
| Figure 109 : Les principaux liens de dépendances entrantes et sortantes du réseau de distribution d'électricité. ....  | 220 |
| Figure 110 : Cartographie des emprises des réseaux de chauffage urbain en Ile-de-France. Source des données : DRIEE IDF. ....  | 221 |
| Figure 111 : Les principaux liens de dépendances entrantes et sortantes du réseau de chauffage urbain. ....  | 222 |
| Figure 112 : Cartographie du réseau de froid de Climespace. Source : <a href="http://atlante.fr/blog/le-reseau-urbain-de-froid-de-paris-une-concession-face-a-la-transition-energetique/">http://atlante.fr/blog/le-reseau-urbain-de-froid-de-paris-une-concession-face-a-la-transition-energetique/</a> ..... | 223 |
| Figure 113 : Cartographie de l'implantation des antennes mobiles de l'opérateur SFR au niveau de l'agglomération parisienne. Source : <a href="https://www.antennesmobiles.fr/">https://www.antennesmobiles.fr/</a> .....  | 224 |
| Figure 114 : Les principaux liens de dépendances entrantes et sortantes du réseau de télécommunications.. ..   | 224 |
| Figure 115 : Les principaux liens de dépendances entrantes et sortantes du réseau de voirie. ....  | 226 |
| Figure 116 : Cartographie du réseau ferré de l'agglomération parisienne. Source : <a href="https://data.iledefrance-mobilites.fr">https://data.iledefrance-mobilites.fr</a> .....  | 227 |
| Figure 117 : Les principaux liens de dépendances entrantes et sortantes du réseau de transports ferré. ....  | 228 |
| Figure 118 : Les types de défaillances en cascade déjà survenues au sein des réseaux lors d'une crue. ....   | 230 |
| Figure 119 : Les types de défaillances en cascade susceptibles de survenir au sein des réseaux lors d'une crue. ....   | 230 |
| Figure 120 : L'importance accordée par les organisations des répondants aux phénomènes de défaillances en cascade dans un contexte de crue. ....   | 231 |
| Figure 121 : Les paramètres pris en compte pour identifier les « vulnérabilités » des infrastructures en cas d'inondation. ....  | 232 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure 122 : Les moyens utilisés par les gestionnaires de réseaux pour déterminer les dépendances entrantes et sortantes de leur réseau.....   | 232 |
| Figure 123 : L'importance accordée au différents types d'(inter)dépendances dans un contexte de crue. ....   | 233 |
| Figure 124 : Les dépendances entrantes et sortantes identifiées par les gestionnaires de réseaux. ....   | 234 |
| Figure 125 : L'origine des informations entrantes des outils de gestion des réseaux. ....  | 236 |
| Figure 126 : Prise en compte des imprécisions dans la gestion d'une situation de crise. ....   | 237 |
| Figure 127 : Les échanges d'informations répertoriés dont les opérateurs interrogés étaient dépendants lors des épisodes de crue de 2016 et 2018. ....   | 238 |
| Figure 128 : Les acteurs auxquels les répondants doivent reporter leur situation et leurs actions. ....  | 239 |
| Figure 129 : Etapes de la démarche menée auprès des gestionnaires de services parisiens. Source : (Toubin, 2014). ....   | 240 |
| Figure 130 : Hiérarchie générique des services urbains parisiens vus par les gestionnaires. Source : (Toubin et al., 2013). ....   | 241 |
| Figure 131 : Identification et localisation des impacts de l'inondation pour une hauteur d'eau de 31,85m NGF au 4 <sup>ème</sup> jour. Source : (Toubin, 2014). ....   | 242 |
| Figure 132 : Capture d'écran du prototype de cartographie en ligne, fondé sur l'évolution temporelle des dysfonctionnements. Source : (Gueben-Veniere, 2019). ....   | 243 |
| Figure 133 : Fonctionnement de la plateforme d'échanges d'informations concernant la crue. ....  | 245 |
| Figure 134 : Modalités de partage des cartographies de vulnérabilité vers la plateforme commune. ....  | 246 |
| Figure 135 : Les berges de la Seine en crue le 03/06/2016, avec le Square du Vert-Galant immergé. Crédits : Auteur.....  | 256 |
| Figure 136 : Périodes de retour des crues observées sur les différents cours d'eau du bassin versant en 2016. Source : (CGEDD, 2017). ....   | 257 |
| Figure 137 : Infiltrations sur les voies du RER C près de la station Javel. Crédits : Joel Saget / AFP. ....   | 259 |
| Figure 138 : Précipitations cumulées des mois de décembre et janvier 2018. Source : (Météo France). ....   | 260 |
| Figure 139 : La commune de Villeneuve-Saint-Georges sous les eaux le 25/01/2018. Crédits : Thomas Samson / AFP.....  | 261 |
| Figure 140 : Hauteur d'eau de la Seine mesurée à la station de Paris Austerlitz entre le 22/01 et le 31/01. Source : Vigicrue.....   | 262 |
| Figure 141 : Hauteur d'eau de la Seine mesurée à la station de Paris Austerlitz entre le 06/01 et le 05/02. Source : Vigicrue.....   | 262 |
| Figure 142 : L'effondrement du talus du RER C et les déchets bloqués au niveau du barrage de Méricourt. Source : (DDT Yvelines). ....  | 265 |
| Figure 143 : Représentation cartographique des scénarios d'inondation R1.0 et R1.15, et des perturbations engendrées sur le réseau de transports en commun.....  | 271 |
| Figure 144 : Les types de modélisations utilisées pour construire les cartographies de vulnérabilité. ....   | 273 |
| Figure 145 : Les sorties des modélisations réalisées pour construire les cartographies de vulnérabilité. ....  | 274 |
| Figure 146 : Exemples de représentations utilisées pour cartographier les vulnérabilités des réseaux : infrastructures coupées (A), buffers autour d'infrastructures coupées (B), linéaires de réseaux coupés (C), îlots coupés (D)..... | 275 |
| Figure 147 : Les imprécisions de la cartographie des zones de fragilité électriques, dues à la présence potentielle de plusieurs lignes électriques. Source : (Cochery, 2019). ....  | 277 |
| Figure 148 : Les incertitudes concernant les coupures électriques estimées d'après les zones de fragilité électriques aux intersections routières. Source : (Cochery, 2019).....   | 278 |
| Figure 149 : Synthèse des incohérences potentielles dans la construction et l'utilisation des cartographies. ..  | 278 |
| Figure 150 : Principe de fonctionnement du couplage faible entre simulateurs sectoriels, communiquant à travers des zones d'impact. Source : (Grangeat, 2017). ....  | 282 |
| Figure 151 : Illustration du processus itératif de construction et de mise à jour des cartographies de fragilités selon les liens de dépendances entre les réseaux.....  | 283 |
| Figure 152 : Les zones de fragilité électrique (ZFE) de l'agglomération parisienne pour un scénario R1.15. ....  | 287 |
| Figure 153 : Les zones de fragilité électrique, représentées sous la forme de buffers (A) et sous la forme d'enveloppes (B).....   | 288 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure 154 : Représentation graphique de la répartition des communes d’Ile-de-France selon les valeurs de l’indice de fonctionnement du réseau de distribution électrique pour différents scénario de crue. ....   | 289 |
| Figure 155 : Représentation sous forme graphique de l'évolution des moyennes des valeurs des indices communaux de fonctionnements du réseau de distribution électrique selon les scénarios de crue pour les départements d’Ile-de-France.....                                  | 290 |
| Figure 156 : Position des communes du département de Val-de-Marne dont les résultats sont présentés ci-dessous. Source du fonds de carte : Géoportail.....   | 291 |
| Figure 157 : Evolution de l'état de fonctionnement des réseaux d'électricité et d'assainissement des communes de St-Maur des Fossés et Joinville-le-Pont. ....   | 292 |
| Figure 158 : Evolution de l'état de fonctionnement des réseaux d'électricité et d'assainissement des communes de Chennevières-sur-Marne et Sucy-en-Brie. ....  | 292 |
| Figure 159 : Formalisation des liens de dépendances et de leurs conséquences sur les systèmes. Source : (Hassel et al., 2015).....   | 326 |
| Figure 160 : Représentation de la formalisation utilisée dans Casceff. Source : (Consortium Casceff, 2018)....   | 326 |
| Figure 161 : Représentation graphique des résultats, reprenant l'évolution des perturbations selon le temps. Source : (Edjossan-Sossou, 2019). ....  | 327 |
| Figure 162 : Représentation graphique et schématique de l'approche CIPMA et de ses objectifs. Source : (Scott, 2007) .....   | 331 |
| Figure 163 : Architecture de l'approche CIPMA. Source : (Scott, 2007) .....  | 331 |
| Figure 164 : Vue d'ensemble des entrées et sorties du modèle de CIPMA. Source : (Scott,2007).....  | 332 |
| Figure 165 : Structure d'un agent et des différentes couches au sein du modèle CISIA. Source : (Foglietta et al., 2015). ....  | 335 |
| Figure 166 : Schématisation de la structure du simulateur : la partie "Entity Pool" pour la gestion de l'évolution des entités et la partie « Transmission Sub System » pour la gestion des communications entre ces dernières. Source : (Stefano Panzieri et al., 2005). .... | 335 |
| Figure 167 : Exemple de représentation d'un système sous CISIAPro. Source : (Palazzo, 2015).....   | 336 |
| Figure 168: Architecture de la base de données supportant Domino. Source : (Pellet, 2009).....   | 340 |
| Figure 169 : Exemple de découpage d'une zone d'étude en secteurs. Source : (Robert et al, 2013). ....  | 341 |
| Figure 170 : Représentation graphique d'un effet domino entre différents réseaux après une coupure d'alimentation en eau. Source : (Robert & Morabito, 2008). ....   | 341 |
| Figure 171: Représentation des besoins en carburant pour les générateurs de secours. Source : (Robert & Morabito, 2008). ....  | 341 |
| Figure 172 : Représentation schématique du processus développé dans le cadre de l'approche Hazur. Source : (Puig et al., 2019).....  | 344 |
| Figure 173 : Représentation graphique des liens de dépendances identifiés entre les différents services/réseaux urbains et leurs infrastructures. Source : (Barreiro et al., 2017).....  | 344 |
| Figure 174 : Représentation SIG des liens de dépendances identifiés entre les différentes services/réseaux urbains et leurs infrastructures. Source : (Barreiro et al., 2017).....   | 345 |
| Figure 175 : Formulaire à destination des opérateurs, pour l'évaluation et le renseignement des dépendances internes et externes. Source : (Toubin, 2014). ....  | 347 |
| Figure 176 : Démarche méthodologique de l'approche développée, à l'échelle du service et du quartier. Source : (Toubin, 2014). ....  | 348 |
| Figure 177 : Représentation graphique des liens de dépendances identifiées entre les différents services urbains. Source : (Toubin, 2014). ....  | 348 |
| Figure 178. Schématisation d'un couplage de modèles d'aléas. Source : (Barreiro et al., 2017). ....  | 351 |
| Figure 179 : Analyser les impacts en cascade d'une inondation au sein de différents services urbains. Source : (Evans et al., 2018). ....  | 351 |
| Figure 180 : Approche cyclique pour identifier les effets cascade tout en impliquant les parties prenantes. Source : (Evans et al., 2018). ....  | 352 |
| Figure 181 : Comparaison des interdépendances dans les cas où elles sont connues et dans le cas où elles sont inconnues et où la méthode des polygones est employée. Source : (Evans et al., 2018).....  | 352 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure 182 : Approche classique d'uniformisation des communications et de la forme des données. Source : (Beyer et al., 2010) .....  | 355 |
| Figure 183 : Le système d'ontologies utilisé. Source : (Flammini et al., 2009) .....   | 355 |
| Figure 184 : Schématisation du fonctionnement de DIESIS et de ses composants. Source : (Rome et al., 2009) .....   | 356 |
| Figure 185 : Schématisation du processus de l'évaluation prévisionnelle des infrastructures. Source : (E. Portante et al., 2016).....  | 359 |
| Figure 186 : Interface de l'outil EPFast. Source : (E. Portante et al., 2016). .....   | 359 |
| Figure 187 : Tableau de bord de l'indice de résilience. Source : (Phillips & Tompkins, 2014) .....   | 360 |
| Figure 188 : Cartographie des zones inondées durant la crue de 1910. Source : Géoportail ( <a href="https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/cruces-du-bassin-de-la-seine-phec">https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/cruces-du-bassin-de-la-seine-phec</a> ) ..... | 361 |
| Figure 189 : Barque sur une voie de la station de métro Odéon. Crédits : Patrice Clavier / Archives départementales de Paris. ....   | 362 |
| Figure 190 : Effondrement du boulevard Haussmann provoqué par la rupture du grand égout. Crédits : World's Graphic Press. ....   | 364 |

## TABLEAUX

|  |     |
|--|-----|
| Tableau 1 : Proposition d'une typologie des infrastructures rencontrées dans les réseaux techniques urbains. 32  |     |
| Tableau 2 : Définitions d'infrastructures critiques ou des termes équivalents en vigueur dans quelques pays. . 34  |     |
| Tableau 3 : Listes des secteurs d'infrastructures critiques identifiés dans (White House, 2013), (European Council Directive 2008/114/EC of 8 December 2008 on the Identification and Designation of European Critical Infrastructures and the Assessment of the Need to Improve Their Protection, 2008), et (Instruction Générale Interministérielle N° 6600/SGDSN/PSE/PSN Relative à La Sécurité Des Activités d'importance Vitale (SAIV), 2014). .... | 35  |
| Tableau 4 : Classement des vulnérabilités des réseaux techniques vis-à-vis des aléas naturels. Source : (CGEDD, 2013). ....  | 43  |
| Tableau 5 : Synthèse des caractéristiques principales des réseaux techniques urbains étudiés .....   | 52  |
| Tableau 6 : Panorama des terminologies et définitions des effets en cascade .....  | 58  |
| Tableau 7 : Grille d'analyse utilisée pour les retours d'expériences de défaillances en cascade. ....  | 73  |
| Tableau 8 : Analyse d'une chaîne de défaillances lors du passage de l'ouragan Sandy à New York (USA) en 2012. ....   | 74  |
| Tableau 9 : Analyse d'une chaîne de défaillances lors du blackout électrique en Californie (USA) en 2000. ....   | 77  |
| Tableau 10 : Analyse d'une chaîne de défaillances lors du blackout des télécommunications à Rome (Italie) en 2004.....   | 78  |
| Tableau 11 : Analyse d'une chaîne de défaillances lors des inondations à Prague (République Tchèque) en 2002. ....   | 79  |
| Tableau 12 : Analyse d'une chaîne de défaillances lors du séisme à Fukushima (Japon) en 2011. ....   | 81  |
| Tableau 13 : Présentation de l'échantillon des références utilisées.....   | 95  |
| Tableau 14 : Les différentes étapes identifiées pour le processus d'étude des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade. ....  | 97  |
| Tableau 15 : Sujets des données d'entrée des démarches étudiées. ....  | 106 |
| Tableau 16 : Données de sorties des démarches étudiées. ....   | 108 |
| Tableau 17 : Récapitulatif des types de modélisation et techniques recensées.....  | 113 |
| Tableau 18 : Présentation de l'échantillon des références utilisées, catégorisées selon les techniques de modélisation.....  | 115 |
| Tableau 19 : Comparaison des approches ascendante et descendante telles que définies par (Petit & Verner, 2016). Source : adapté et traduit de (Petit & Verner, 2016). ....  | 117 |
| Tableau 20 : Proposition de rangement des démarches analysées dans la typologie développée.....  | 123 |

|  |     |
|--|-----|
| Tableau 21 : Responsabilités associées aux différentes actions relatives aux infrastructures critiques. Source : (NATO, 2007). .....   | 131 |
| Tableau 22 : Répartition des attributions et missions relatives à la place des réseaux techniques au sein des problématiques de gestion de crise et de sécurité civile entre les parties prenantes. .... | 133 |
| Tableau 23 : Les motivations des secteurs privé et public à participer à un partenariat public-privé (PPP). ....   | 138 |
| Tableau 24 : Recensement des catégories de données d'entrée rencontrées .....  | 139 |
| Tableau 25 : Extrait de la grille d'analyse de REX, adapté de (Daniel, 2017) .....   | 143 |
| Tableau 26 : Extrait d'un tableau AMDE des défaillances des réseaux urbains, adapté de (Lhomme, 2012) ....   | 144 |
| Tableau 27 : Extrait de l'application de l'AMDE adaptée pour le cas du réseau d'assainissement de la ville de New York durant l'ouragan Sandy en 2012 aux Etats-Unis. ....                               | 148 |
| Tableau 28 : Grille de scénario utilisée lors de l'exercice Sequana 15/18. Source : (Zone de Défense, 2019). ..  | 155 |
| Tableau 29 : Grille de scénario proposée pour optimiser le recueil d'informations concernant les liens de dépendances et les cascades d'événements.....  | 155 |
| Tableau 30 : Grille d'analyse du contexte auprès des parties prenantes. ....   | 174 |
| Tableau 31 : Spécifications génériques des approches ascendantes, descendantes et fédératrices. ....   | 178 |
| Tableau 32 : Description du profil 1. ....   | 180 |
| Tableau 33 : Description du profil 2. ....   | 181 |
| Tableau 34 : Description du profil 3. ....   | 182 |
| Tableau 35 : Description du profil 4. ....   | 183 |
| Tableau 36 : Description du profil 5. ....   | 184 |
| Tableau 37 : Description du profil 6. ....   | 185 |
| Tableau 38 : Description du profil 7. ....   | 186 |
| Tableau 39 : Les documents règlementaires correspondant aux différents échelons territoriaux et les initiatives correspondantes pour la gestion du risque inondation. ....                               | 196 |
| Tableau 40 : Les principaux acteurs de la gestion du risque inondation dans l'agglomération parisienne en relation avec les réseaux techniques urbains. ....   | 199 |
| Tableau 41 : Présentation des répondants de l'enquête réalisée auprès des opérateurs.....  | 211 |
| Tableau 42 : Grille d'analyse du contexte auprès des parties prenantes. ....   | 212 |
| Tableau 43 : Définitions de « défaillance en cascade » utilisées par les répondants .....  | 229 |
| Tableau 44 : Analyse de l'approche développée par (Toubin, 2014). ....   | 241 |
| Tableau 45 : Analyse de l'approche développée par (Gueben-Veniere, 2019). ....   | 244 |
| Tableau 46 : Bilan de l'analyse de la situation pour l'agglomération parisienne et ses parties prenantes. ....   | 248 |
| Tableau 47 : Réaliser un diagnostic global des réseaux techniques urbains, identifier de nouvelles (inter)dépendances. ....  | 253 |
| Tableau 48 : Identifier des zones géographiques sensibles et vulnérables à un événement initiateur donné. .  | 253 |
| Tableau 49 : Grille d'analyse des défaillances recensées lors d'un événement de crue passé.....  | 255 |
| Tableau 50 : Extrait de l'application de l'AMDE aux retours d'expérience .....   | 255 |
| Tableau 51 : Défaillances recensées au sein des réseaux techniques urbains lors de la crue de mai et juin 2016. ....   | 257 |
| Tableau 52 : Défaillances recensées au sein des réseaux techniques urbains lors de la crue de janvier et février 2018.....   | 263 |
| Tableau 53 : Extrait de l'application de l'AMDE adaptée pour le cas du réseau de distribution d'électricité lors de la crue de janvier et février 2018. ....   | 267 |
| Tableau 54 : Définitions de "zone de vulnérabilité" utilisées par les opérateurs. ....   | 272 |
| Tableau 55 : Caractéristiques des cartographies de vulnérabilités partagées en janvier 2019. ....  | 276 |
| Tableau 56 : Proposition de notice explicative à cocher accompagnant les cartographies partagées par les opérateurs. ....  | 281 |
| Tableau 57 : Formules applicables pour le calcul des indices selon les types de réseaux et les données disponibles. ....   | 286 |
| Tableau 58 : Caractéristiques des cartographies de fragilités proposées par Enedis. ....   | 287 |
| Tableau 59 : Processus de calcul des indices de dégradation du fonctionnement du réseau de distribution électrique pour quelques communes des Hauts--de-Seine. ....                                      | 288 |

|   |     |
|---|-----|
| Tableau 60 : Pourcentage de communes où le réseau de distribution électrique est impacté pour les différents scénarios de crue..... | 289 |
| Tableau 61 : Evolution des indices pour l'électricité et l'assainissement au niveau de différentes communes.                        | 291 |
| Tableau 62 : Présentation du projet Casceff .....   | 324 |
| Tableau 63 : Présentation du programme CIPMA .....  | 328 |
| Tableau 64 : Présentation de l'approche CISIA .....   | 333 |
| Tableau 65 : Présentation de l'approche DOMINO.....   | 337 |
| Tableau 66 : Présentation de l'outil HAZUR. ....  | 342 |
| Tableau 67 : Présentation de l'approche RESILIS. ....   | 346 |
| Tableau 68 : Présentation du projet RESCCUE. ....   | 349 |
| Tableau 69 : Présentation des initiatives portées par le NISAC. ....  | 357 |
| Tableau 70 : Défaillances recensées au sein des réseaux techniques urbains lors de la crue de janvier 1910. .                       | 362 |

## INTRODUCTION

Les villes, les territoires et leurs habitants deviennent toujours plus dépendants des réseaux techniques urbains, exigeant d'eux qu'ils soient toujours disponibles et fonctionnels. Par ailleurs, ces réseaux, bien que performants et robustes dans leur gestion quotidienne, sont vulnérables aux aléas majeurs (CGEDD, 2013) et dépendants les uns des autres (Rinaldi et al., 2001). Les systèmes de signalisation et d'éclairage, les pompes et stations de relevage, mais aussi les systèmes de contrôle et de supervision sont ainsi dépendants à leur alimentation électrique par exemple.

L'augmentation des risques relatifs au fonctionnement de ces réseaux sont notamment liés à l'urbanisation, au vieillissement des infrastructures, à la diminution du contrôle de l'Etat et à la multiplication des acteurs dues à la libéralisation et à la privatisation, mais aussi à l'utilisation accrue de l'informatique, à l'augmentation des interconnexions et des chaînages entre les parties prenantes et les systèmes, et à la recherche continue de l'efficacité et de la rentabilité. Nous assistons par ailleurs à la multiplication des menaces, que ce soit des aléas naturels, notamment suite aux changements climatiques actuels et à la raréfaction de certaines ressources, ou des actes malveillants. Ces phénomènes augmentent alors les risques relatifs aux réseaux urbains et leurs impacts.

Les objets techniques étudiés tout au long de cette thèse, et au sein desquels surviennent les défaillances en cascade, sont les réseaux urbains. Cette recherche se positionne dans le domaine du génie urbain, qui s'intéresse autant aux aspects techniques qu'organisationnels des objets et processus qui permettent le fonctionnement des villes et la vie en leur sein (Diab & Landau, 2017). Nous définissons ici un réseau technique urbain comme le support matériel et organisationnel des services urbains nécessaires au bon fonctionnement de la ville. La résilience des systèmes urbains repose donc sur la résilience des services urbains et des réseaux techniques sur lesquels ils s'appuient (Lhomme, 2012).

Ces réseaux, et leurs infrastructures, peuvent être dépendants ou interdépendants (Rinaldi et al., 2001). Une dépendance entre deux systèmes se traduit par la capacité d'un système à influencer sur l'état de l'autre système, tandis qu'une interdépendance apparaît lorsque la relation de dépendance est bidirectionnelle, et que l'état de chaque infrastructure influence l'état de l'autre. Ces liens de dépendance peuvent alors entraîner une propagation des défaillances d'un système à d'autres et entraîner l'aggravation progressive des conséquences, ainsi que l'augmentation de la zone touchée et de la durée de perturbation.

L'ouragan Sandy, survenu aux Etats-Unis en 2012, est un exemple d'événement ayant initié de nombreux enchaînements de défaillances. L'inondation de postes électriques a notamment entraîné la coupure de l'électricité sur des zones très étendues, ce qui a entre autres eu pour conséquence l'arrêt des raffineries de pétrole et par effet domino l'arrêt de l'approvisionnement de stations essence qui n'étaient pas touchées par les impacts de premier ordre - c'est-à-dire provoqués directement par l'aléa (Haraguchi & Kim, 2014). Et ce, alors même que l'approvisionnement de ces stations devenait un enjeu primordial pour faire face aux problèmes de mobilité, engendrés par le dysfonctionnement du métro new-yorkais, mais aussi aux nouveaux besoins en matière d'hydrocarbures, nécessaires pour faire fonctionner des groupes électrogènes.

L'étude et la modélisation des phénomènes d'(inter)dépendances (voir p. 44 pour la justification de l'utilisation des parenthèses) et de défaillances en cascade au sein des réseaux techniques urbains apparaissent alors centrales dans les processus d'amélioration de la résilience urbaine. Ces questions font d'ailleurs l'objet de nombreuses recherches depuis une dizaine d'années, qui se concentrent principalement sur les théories et modèles à mettre en œuvre (Ouyang, 2014; Setola et al., 2017; Zio, 2018). Afin d'améliorer la résilience du système urbain (Lhomme, 2012), ces travaux peuvent notamment chercher à identifier les relations de dépendances existantes, les nœuds d'interconnexion les plus vulnérables ou préjudiciables, les impacts indirects d'un événement initiateur, les scénarios de défaillances en cascade particulièrement probables ou critiques. Ces démarches se révèlent très diverses, peu documentées, difficilement comparables, et leur mise en œuvre s'avère difficile. La nécessité de collaboration entre de nombreux acteurs très variés de par leurs natures, leurs missions, leurs modes de gouvernance, leurs obligations réglementaires, leurs objectifs, et leurs moyens incarne une difficulté supplémentaire à la mise en œuvre de telles initiatives. Les parties prenantes locales doivent donc faire face à de nombreux défis scientifiques et opérationnels pour le choix, le développement et la mise en œuvre d'une démarche d'identification, d'analyse voire de modélisation des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade dans les réseaux techniques urbains.

---

La zone d'étude analysée dans le cadre de ces travaux est l'agglomération parisienne. Ce territoire urbain est au cœur de nombreux enjeux géopolitiques, socio-économiques et stratégiques et présente une complexité très forte, notamment au niveau des questions de gouvernance et de relations entre les nombreuses parties prenantes. Ce territoire est particulièrement vulnérable au risque de crue majeure, notamment par le biais de ses réseaux techniques qui sont nombreux, denses et dépendants les uns des autres. 830 000 personnes vivent en effet en zone inondable et 5 millions pourraient être indirectement impactées par les conséquences d'une crue majeure, notamment par les coupures de réseaux en cascade (OCDE, 2014a).

De sorte qu'aujourd'hui, la politique de prévention des inondations ne se concentre plus seulement sur l'aléa (Reghezza, 2006) mais vise notamment à réduire la vulnérabilité de l'agglomération liée aux dysfonctionnements des réseaux techniques structurants, qui ralentissent le retour à la normale et multiplient les impacts de l'inondation au-delà de la zone inondée (DRIEE, 2015). Les crues de juin 2016 et janvier 2018 ont également ravivé la mémoire de ce type d'aléa et des potentiels impacts sur le fonctionnement de l'agglomération (CGEDD, 2017 ; MRN, 2018 ; Pottier et al., 2017).

Différentes initiatives ont vu le jour ces dernières années au niveau de ce territoire complexe pour améliorer l'identification des liens de dépendances au sein de ces réseaux, la prévision des impacts potentiels d'une crue et le travail collaboratif entre les parties prenantes locales. On peut ici citer les travaux de diagnostic collaboratif des interdépendances des réseaux parisiens (Toubin, 2014), les exercices de gestion de crise organisés par les services de l'Etat et les collectivités (November & Créton-Cazanave, 2017; Toubin, 2014), la construction d'une plateforme de partage des vulnérabilités des différents opérateurs, la création d'un prototype de cartographie temporelle des plans de continuité d'activité de différents gestionnaires (Gueben-Veniere, 2019). Ces initiatives se heurtent cependant à des difficultés organisationnelles, techniques, et opérationnelles, et à un manque de coordination centrale.



Nous précisons ici que cette recherche s'appuie sur les travaux effectués dans le cadre de deux projets de recherche interdisciplinaires :

- Le projet ANR RGC4 (Résilience et Gestion de Crise dans un Contexte de Crue à Cinétique lente - Développement d'outils pour l'aide à la gestion des réseaux techniques critiques - Application au Grand Paris) qui ambitionne le développement d'outils opérationnels pour l'amélioration de la continuité d'activité des services urbains du Grand Paris et des réseaux techniques associés face aux crues majeures à cinétique lente (Vuillet, 2020) (<https://rgc4.wordpress.com/>).
- Le projet H2020 RESCCUE (Resilient Cities facing Climate Change) qui a pour objectif de proposer des outils et méthodes innovantes pour améliorer les capacités des villes à faire face et à se relever face aux chocs et stress auxquelles elles sont exposées, en maintenant la continuité des services urbains. Basé sur une approche holistique et collaborative, ce projet analyse les interconnexions entre les différents services urbains - avec un focus sur le réseau d'eau potable - pour 3 villes européennes : Barcelone, Lisbonne et Bristol (<http://www.resccue.eu/resccue-project>).

Cette recherche s'inscrit donc dans un contexte scientifique très fourni et dynamique visant le développement de méthodologies et d'outils à destination des parties prenantes opérationnelles (opérateurs, collectivités, services de l'Etat) pour l'amélioration de leur résilience à travers les réseaux techniques urbains. Les actions menées dans le projet RESCCUE, bien que non centrées sur notre zone d'étude, ont permis de prendre du recul et de fournir des éléments pour l'état de l'art et l'analyse des processus de mise en œuvre.

---

Le travail de thèse présenté dans ce manuscrit vise donc à appréhender les phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade, à les définir et à les caractériser. La question de leur identification, analyse, modélisation et prédiction est ensuite soulevée, entraînant l'exploration des outils et démarches existantes. L'objectif est alors d'apporter des éléments de connaissance, d'analyse et d'aide au choix aux potentiels porteurs (et leurs accompagnateurs scientifiques et techniques) d'une démarche d'analyse et de modélisation des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade, notamment pour la sélection, le développement et la mise en œuvre d'une démarche dans un contexte donné.

Les travaux présentés se basent principalement sur des analyses épistémologiques, conceptuelles et empiriques, par le biais de différents moyens de recueil d'informations (travaux bibliographiques, analyse de retours d'expérience, état de l'art, expériences dans le cadre des projets de recherche, entretiens, enquête et diagnostic auprès des parties prenantes de notre contexte d'étude). Ces éléments seront appliqués au cas de l'agglomération parisienne, dans le contexte d'une crue majeure. Des traitements portant sur les données disponibles au niveau de notre zone d'étude sont également expérimentés.

La première partie du manuscrit a pour objectif d'identifier les enjeux relatifs à notre problématique, d'introduire les concepts gravitant autour de notre sujet de recherche, et de poser les fondations du travail réalisé. Le premier chapitre s'intéresse donc aux concepts gravitant autour des réseaux urbains et de leurs infrastructures. Dans un second temps ce chapitre traite des vulnérabilités de ces réseaux urbains, et notamment de leurs (inter)dépendances, à l'origine des défaillances en cascade. Le second

chapitre introduit les phénomènes de défaillances en cascade, qui seront nos objets d'étude tout au long de ce travail de recherche.

Après avoir discuté des définitions existantes de ces phénomènes complexes, nous y présentons un travail de description et de caractérisation, ainsi qu'une première discussion sur l'analyse de ces phénomènes. Le troisième et dernier chapitre de cette première partie a pour objectif d'illustrer et de questionner les propos présentés dans les deux premiers chapitres, en présentant des éléments d'analyse empirique et des retours d'expériences de défaillances en cascade survenues à travers le monde.

Les enseignements et conclusions de cette première partie nous amènent à considérer l'intérêt de leur étude, que ce soit après ou avant leur survenue, et de façon empirique ou grâce des modèles. Des processus d'analyse et de modélisation peuvent en effet être utiles à l'amélioration des connaissances et des prévisions des (inter)dépendances et défaillances en cascade au sein des réseaux techniques urbains. L'objectif est alors de développer des démarches et des outils pour aider les parties prenantes - y compris les gestionnaires de réseaux, les acteurs de la gestion de crise, les principaux responsables de la sécurité civile ou les décideurs - à identifier des scénarios de défaillances en cascade afin d'envisager des solutions, participer à la planification de crise, ainsi que consolider la prise de décision en matière de gestion de crise.

Cette question de prévision, d'étude et de modélisation se situe au cœur de la deuxième partie de ce manuscrit. Celle-ci a pour objectif d'apporter des éléments de connaissance, d'analyse et d'aide au choix aux potentiels porteurs et utilisateurs d'une démarche d'analyse et de modélisation des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade. Afin de construire une réflexion documentée, le quatrième chapitre identifie et dresse un portrait des différentes méthodes utilisées aujourd'hui à travers un état de l'art. Ce chapitre est également l'occasion de proposer une typologie de ces démarches. Le cinquième chapitre s'intéresse quant à lui à la mise en oeuvre opérationnelle de ce type de démarche, et surtout aux défis et difficultés relatifs à celle-ci. Le sixième chapitre amène finalement la question d'aide au choix pour des parties prenantes opérationnelles, grâce aux enseignements des chapitres précédents. Nous y proposons différents éléments et recommandations pour garantir l'adéquation d'une démarche à son contexte, selon les objectifs poursuivis.

La troisième et dernière partie du manuscrit se concentre quant à elle sur notre zone d'étude : l'agglomération parisienne face au risque de crue majeure. Grâce aux enseignements des deux premières parties, celle-ci propose dans les chapitres 7 et 8 un panorama et une analyse de la situation actuelle concernant la complexité du territoire et la problématique des réseaux techniques urbains, de leurs vulnérabilités et (inter)dépendances ainsi que des défaillances en cascade potentielles. Le chapitre 9 a finalement pour ambition d'apporter des éléments de diagnostic et des propositions pour améliorer la prise en compte et la prévision des (inter)dépendances et des défaillances en cascade au sein des réseaux techniques urbains de l'agglomération.

**PARTIE I**

CHAPITRE 1 : Analyse épistémologique et empirique des réseaux techniques urbains et des infrastructures critiques et de leurs (inter)dépendances.



CHAPITRE 2 : Analyse conceptuelle, épistémologique et empirique des défaillances en cascade.



CHAPITRE 3 : Analyse empirique de retours d'expériences de scénarios en cascade par une grille d'analyse commune.



**PARTIE II**

CHAPITRE 4 : Etat de l'art des méthodes et démarches pour l'identification, l'analyse et la modélisation des (inter)dépendances et des défaillances en cascade et proposition d'une typologie.



CHAPITRE 5 : Analyse empirique des limites à la mise en œuvre de ces démarches.



CHAPITRE 6 : Propositions pour sélectionner, construire et mettre en œuvre une démarche adaptée au contexte et porteuse d'avancées.



**PARTIE III**

CHAPITRE 7 : Etat de l'art du risque de crue au sein de l'agglomération parisienne, et de la complexité de ce territoire.



CHAPITRE 8 : Diagnostic du contexte opérationnel, par le biais d'analyses bibliographiques, d'entretiens et d'une enquête auprès des opérateurs de réseaux.



CHAPITRE 9 : Pistes de réflexions et propositions d'applications pour l'agglomération parisienne.

PARTIE I - LES DEFAILLANCES EN  
CASCADE AU SEIN DES RESEAUX  
TECHNIQUES URBAINS : CONTEXTE,  
ORIGINES, CARACTERISATION ET  
ILLUSTRATION

## PREAMBULE DE LA PARTIE I

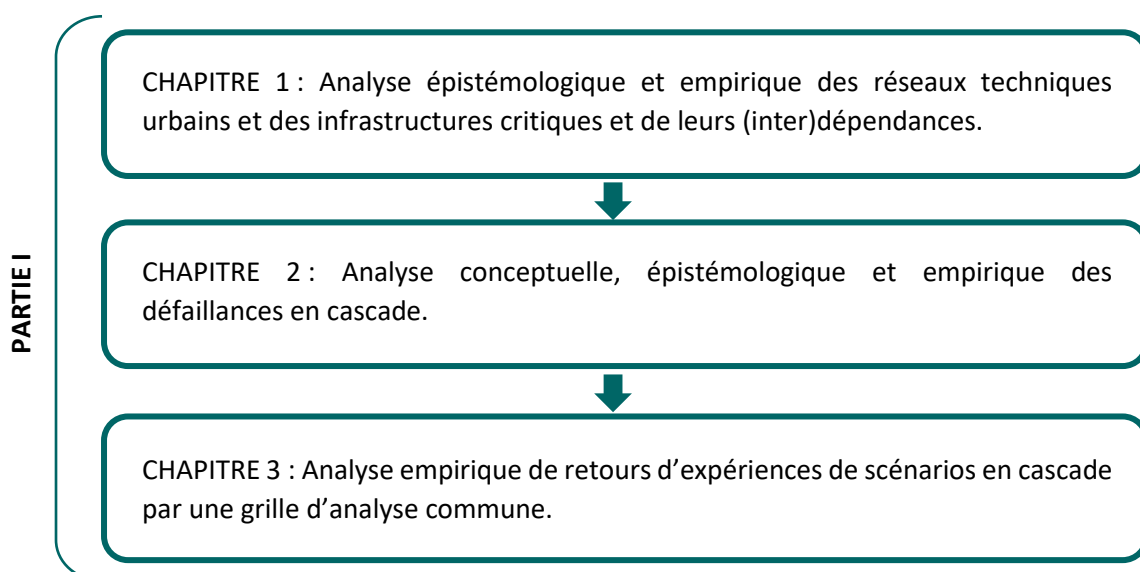
Ce préambule introduit la première partie de la thèse, composée de trois chapitres. Cette partie a pour objectif d'identifier les enjeux relatifs à notre problématique, d'introduire les concepts gravitant autour de notre sujet de recherche, et de poser les fondations du travail réalisé.

Le premier chapitre s'intéresse donc aux concepts gravitant autour des réseaux urbains et de leurs infrastructures, car ce sont en leur sein qu'apparaissent les phénomènes de défaillances en cascade que nous étudions. Il permet dans un premier temps d'introduire et d'explicitier les notions de service urbain, de réseau technique urbain et d'infrastructure et de discuter de leurs spécificités, de leur complexité, ainsi que de leur diversité. Une discussion sur la criticité de ces réseaux urbains pour le fonctionnement de la ville, et ce en temps normal, de crise, ou de relèvement, est également présentée. Dans un second temps ce chapitre traite des vulnérabilités de ces réseaux urbains, et notamment de leurs (inter)dépendances, qui sont à l'origine des défaillances en cascade. Une synthèse des éléments évoqués sur les réseaux techniques urbains est présentée à la fin du chapitre.

Le second chapitre introduit les phénomènes de défaillances en cascade, qui seront nos objets d'étude tout au long de ce travail de recherche. Après avoir discuté des définitions potentielles de ces phénomènes complexes, nous présentons un travail de description et de caractérisation détaillée. Une première discussion sur l'analyse de ces phénomènes, sujet central de ce travail de recherche qui sera approfondi dans la partie II, est ensuite lancée.

Le troisième et dernier chapitre de cette première partie a pour objectif d'illustrer et de questionner les propos présentés dans les deux premiers chapitres, en présentant des éléments d'analyse des retours d'expériences de défaillances en cascade survenues à travers le monde. Un portfolio d'événements passés comportant des défaillances en cascade vient compléter des éléments de la littérature scientifique plus statistique. Les événements sont analysés selon une grille de lecture construite à partir des éléments présentés aux chapitres précédents.

Cette première partie permet de poser les enjeux du sujet de recherche, et d'introduire la problématique générale de celui-ci, à savoir l'étude et la modélisation des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade au sein des réseaux techniques urbains.



# CHAPITRE 1 : LES RESEAUX TECHNIQUES ET INFRASTRUCTURES CRITIQUES : ENTRE COMPLEXITES, VULNERABILITES ET (INTER)DEPENDANCES

Ce chapitre 1 a pour objectif principal d'introduire et d'expliciter les différents objets physiques qui seront étudiés tout au long de ce travail de recherche, et de poser le cadre des analyses qui seront réalisées par la suite. Ce chapitre permet ainsi d'appréhender et d'analyser le contexte dans lequel les phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade évoluent, les objets qu'ils affectent, et leurs origines.

Il a tout d'abord pour ambition de définir et de caractériser les réseaux techniques urbains, sièges des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade considérés, notamment au niveau de leur organisation et de leur composition. Les services urbains, qui s'appuient sur les réseaux techniques, et les infrastructures qui composent les réseaux techniques, sont également définis. Les notions d'infrastructure critique et essentielle sont par ailleurs introduites, car elles sont préférées à la notion de réseau au niveau international. Les différences et les ambiguïtés de ces différents concepts sont discutées.

Nous justifions finalement notre choix de considérer les réseaux techniques urbains comme des infrastructures critiques, si nous considérons une échelle urbaine et non nationale. Nous démontrons pour cela l'importance de ces réseaux urbains pour le bon fonctionnement de la ville.

Les aléas auxquels sont exposés ces réseaux urbains et leurs vulnérabilités sont ensuite caractérisés pour permettre l'introduction d'un type de vulnérabilité externe particulier : les (inter)dépendances à l'intérieur de ces réseaux mais aussi entre ces réseaux. Nous choisissons en effet de considérer les (inter)dépendances comme une composante de la vulnérabilité de ces systèmes. Ces phénomènes sont alors définis et caractérisés.

Un tableau synthétique clôture ce chapitre 1. Il reprend les éléments d'analyse principaux discutés concernant les réseaux urbains, qui pourra être utile pour la compréhension et la visualisation d'éléments présentés dans les chapitres suivants.

## 1.1. LES RESEAUX TECHNIQUES URBAINS, TERREAU DES DEFAILLANCES EN CASCADE

Les objets physiques/matériels étudiés tout au long de cette thèse, et parmi lesquels occurrent les défaillances en cascade, sont les réseaux techniques urbains. Nous allons tenter de les définir et de les caractériser ci-dessous, en parallèle de la définition et de la présentation des infrastructures dites critiques ou essentielles, qui font actuellement l'objet de nombreux travaux. Nous tenterons de définir les contours de ces deux concepts et nous discuterons ensuite de leur importance dans les processus permettant le fonctionnement de la ville.

### 1.1.1. Les réseaux techniques urbains : introduction à des systèmes complexes

Les réseaux sont entendus ici au sens génie urbain du terme, et non pas au sens où l'entendent généralement les géographes, c'est-à-dire les réseaux de villes et l'organisation de ces villes et de leurs

acteurs dans l'espace. L'étymologie latine du mot prend ses racines dans le terme « retiolus » diminutif de « retis » qui signifie « filet ». On retrouve aujourd'hui ce terme dans de nombreux domaines et disciplines. Un réseau est notamment défini par le dictionnaire Larousse comme un ensemble formé de lignes ou d'éléments qui communiquent ou s'entrecroisent. Ce même dictionnaire donne une définition complémentaire qui pourrait correspondre aux spécificités du terme de réseau technique urbain, en tant qu'« ensemble de circuits, de canalisations et des appareils qui les relient, permettant la circulation et la distribution de l'électricité, de l'eau, du gaz, du téléphone, etc. ».

Différentes définitions du terme de réseau technique urbain sont utilisées aujourd'hui, principalement dans le contexte français. Elles diffèrent notamment selon les cadres et les domaines d'utilisations. Il n'existe pas de définition formelle des réseaux techniques urbains acceptée par tous, et c'est pourquoi nous avons recensé ici celles qui nous paraissent pertinentes dans notre contexte d'étude. Gleyze (2005) définit au départ un réseau par l'existence d'échanges et de relations entre des acteurs, et il utilise donc le terme de réseaux d'infrastructures pour les réseaux physiques que nous étudions ici. En effet, l'analyse des risques nécessite des objets d'étude « ancrés matériellement sur le territoire afin de donner prise à l'action physique des phénomènes et de générer en cascade des dommages indirects ». Il distingue alors deux catégories de réseaux d'infrastructures selon les éléments acheminés, avec d'un côté les réseaux de transport qui acheminent les personnes et les biens et de l'autre les réseaux dits techniques qui acheminent les informations, les ressources et les énergies.

Le Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable (CGEDD, 2013) utilise également cette expression de « réseaux d'infrastructures » et la précise en distinguant notamment les « réseaux structurants » (c'est-à-dire le réseau électrique (transport et distribution), les réseaux de communications électroniques, les réseaux d'eau et d'assainissement, les réseaux de gaz et de distribution d'hydrocarbures) et les réseaux de transport.

Pour le CEPRI (Centre Européen de Prévention du Risque Inondation), un réseau (au sens où nous entendons réseau technique urbain) se définit de façon très concrète par (CEPRI, 2016) :

- « une structure, avec des linéaires (câble, canalisation, voie, etc.) et des nœuds qui peuvent être des centres de production, de transformation, de stockage, etc. chacun ayant plus ou moins d'importance pour le fonctionnement global du réseau ;
- des flux, soumis à des fluctuations de production/ transfert/ consommation : électricité, eaux, déchets, véhicules, informations, etc. ;
- des connexions avec d'autres réseaux, formant des dépendances fonctionnelles (échange de ressources) ou géographiques (proximité physique) ;
- un pilotage, à la fois technique et humain ;
- du personnel, nécessaire à la gestion, la surveillance, l'entretien et l'éventuelle réparation des diverses installations. »

L'homme souligne qu'il n'existe donc pas une définition formelle reconnue des réseaux techniques, et qu'il serait d'ailleurs difficile d'arrêter une définition (Lhomme, 2012) de par le caractère assez vague des termes de réseau mais aussi de technique (Dupuy, 1977). Il souligne quand même que ce sont des systèmes techniques créés et gérés par l'Homme, et optimisés par des ingénieurs pour faciliter le fonctionnement de la ville. C'est d'ailleurs en cela que cette recherche se positionne dans la discipline

du génie urbain, reliée à l'urbanisme et au management technique urbain, qui s'intéresse autant aux aspects techniques que sociaux des objets et processus qui permettent le fonctionnement des villes et la vie en leur sein (Diab & Landau, 2017).

Sans donner de réelle définition, Lhomme précise ensuite qu'un réseau technique est caractérisé par au moins trois niveaux d'analyse « 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 » (Lhomme, 2012).

Toubin (2014) choisit également de se baser sur les différentes dimensions des réseaux, en distinguant la dimension topologique – c'est-à-dire la structure - du réseau, la dimension rhéologique – c'est-à-dire les flux (Lévy et Lussault, 2003) – et la dimension stochastique – c'est-à-dire les processus de transition, réservoirs et consommations (Parrochia, 2005). Ainsi, si l'on parle des réseaux urbains, ceux-ci transportent divers flux et grandeurs : des véhicules, de l'électricité, de l'information, de l'eau, des déchets, de la chaleur, etc. Les réseaux sont par ailleurs des systèmes sociotechniques composés d'équipements interconnectés qui sont planifiés et gérés de manière centralisée, que ce soit à une échelle locale ou plus large, offrant un service sur un territoire qu'il contribue à solidariser (Coutard & Rutherford, 2009).

Nous avons choisi de nous positionner dans le cadre du génie urbain dans la suite de ce travail, et de définir un réseau technique urbain comme le support matériel (c'est-à-dire un ensemble d'infrastructures linéaires et nodales), et organisationnel (comprenant le pilotage et la gestion) des services urbains nécessaires au bon fonctionnement de la ville. Les services urbains sont ici considérés comme des dispositifs sociotechniques de maîtrise de l'environnement (ressources et milieux) pour la satisfaction des besoins et des exigences nécessaires aux activités humaines (Bris & Coutard, 2008). Ces réseaux urbains sont dits techniques car ils englobent un ensemble d'éléments physiques reliés entre eux, qui permettent la circulation et la distribution des flux relatifs aux services urbains tels que l'électricité, l'eau, l'information etc. Le terme équivalent de « réseau de support à la vie » est également usité (Pellet, 2009; Robert, 2004).

Nous représentons dans la Figure 1 les cinq catégories de réseaux que nous avons identifiées, et que nous avons caractérisés selon les flux et matières qui les parcourent. On dénombre la catégorie des réseaux de transport, qui transportent des biens et des personnes, celle des réseaux qui transportent de l'eau (potable ou usée), celle des réseaux qui transportent des déchets, celle des réseaux qui transportent les différents types d'énergie et de carburants, et enfin la catégorie des réseaux de télécommunications qui « transportent » des informations. Dans ces catégories, on distingue également des sous-réseaux selon les flux transportés et les fonctions assurées.

On distingue par exemple, au niveau des réseaux de transport, le transport de véhicules et piétons sur des voiries et le transport direct des usagers (personnes ou biens) dans des wagons en mouvement sur des voies ferrées. Pour les réseaux d'eau, on distingue le réseau d'eau potable qui achemine l'eau potable aux usagers, et le réseau d'assainissement qui collecte les eaux usagées à la sortie des habitations et les eaux pluviales, de façon unitaire ou séparée. Pour la gestion des déchets, on distingue la collecte, le transport des déchets puis leur traitement et potentielle valorisation. Au niveau des réseaux d'énergie, on distingue le réseau de gaz, d'électricité, d'hydrocarbures mais aussi de fluides calorifiques (chaud et froid) selon le type d'énergie transportée. Et pour les réseaux de télécommunications, on distingue la téléphonie fixe, mobile et l'internet.



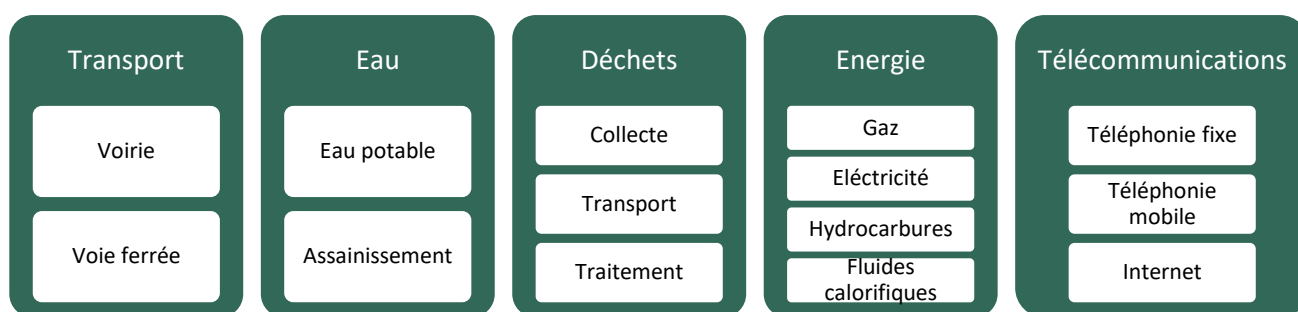


Figure 1 : Services et réseaux urbains génériques identifiés, selon le type d'objets qu'ils transportent

Nous pouvons également décomposer les différents réseaux urbains en sous-réseaux, selon les fonctions qu'ils assurent comme présenté dans la Figure 2. En effet, ces fonctions s'appuient sur des parties bien distinctes des réseaux.

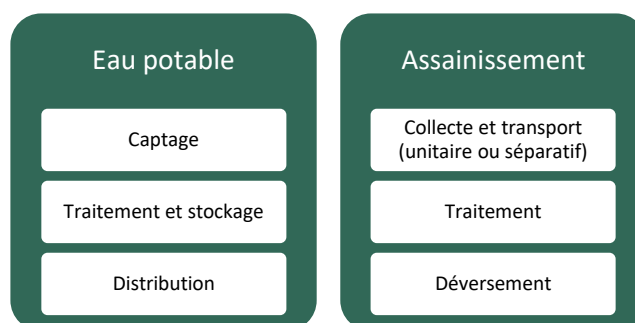


Figure 2 : Réseaux et sous-réseaux génériques identifiés, pour l'exemple du service « Eau »

Chaque sous-réseau peut alors être décomposé en différents composants génériques, comme illustré par la Figure 3.

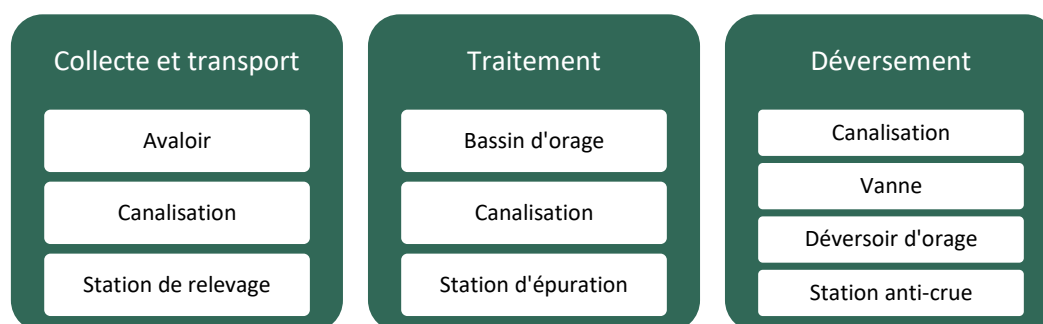


Figure 3 : Composants génériques identifiés, pour l'exemple des sous-réseaux du réseau « Eau potable »

Les réseaux techniques urbains sont ainsi composés notamment d'infrastructures linéaires et nodales. Étymologiquement, le mot infrastructure vient du latin *infra-structura*, *infra* signifiant « dessous » et *struere* signifiant « construire », c'est-à-dire « au-dessous de la construction ». Les infrastructures désignent aujourd'hui dans le langage courant l'ensemble des ouvrages constituant l'implantation d'une construction ou d'un ensemble d'installations. L'échelle de l'infrastructure semble pertinente lors de l'analyse du fonctionnement d'un réseau technique, et sera exploitée par la suite. Nous précisons qu'une infrastructure peut être elle-même découpée en composants qui concourent à la réalisation de la fonction de l'infrastructure (par exemple un tuyau, un bassin, une vanne, un câble...).

En s’inspirant et en complétant la typologie d’infrastructures de réseaux de Toubin (2014), nous listons dans le Tableau 1 les différentes infrastructures linéaires et nodales de réseau identifiées :

Tableau 1 : Proposition d’une typologie des infrastructures rencontrées dans les réseaux techniques urbains

|                           |   |
|---------------------------|---|
| Infrastructures nodales   | Nœuds de production : usines, centrales                                 |
|                           | Nœuds de transformation : transformateurs, pompes, usines de traitement |
|                           | Nœuds de stockage : réservoirs, centres de tri, dépôts                  |
|                           | Nœuds de « consommation » : habitations, entreprises, gares             |
|                           | Nœuds de contrôle : centre de contrôle, capteurs, vannes                |
| Infrastructures linéaires | Linéaires de transport de fluides : canalisations                       |
|                           | Linéaires de transport de wagons : tronçons de voie ferrée              |
|                           | Linéaires de transport d’informations ou d’électrons : câbles           |
|                           | Linéaires de transport de véhicules et de piétons : tronçons de routes  |

Les réseaux techniques urbains peuvent ainsi être considérés comme des systèmes de systèmes (Krob, 2014), mais aussi comme des systèmes complexes composés d’un grand nombre de composants très divers, en termes de nature et granularité notamment. La structure en réseau, inhérente aux systèmes d’infrastructures (réseaux informatiques, d’énergie, et de transport par exemple) se révèle complexe par plusieurs aspects.

Leur structure (nœuds et arcs), la diversité de leurs composants (nature des nœuds et des arcs), les processus d’évolution et de redéploiement, la diversité des liens possibles entre les différents nœuds (poids, direction, signification), l’aspect dynamique (l’état de chaque nœud peut varier dans le temps), leur intégration dans un environnement complexe sont autant de dimensions de la complexité de ce type de réseau (Strogatz, 2001).

### 1.1.2. Les réseaux techniques urbains : infrastructures critiques parmi d’autres ?

Il convient à présent d’introduire la notion d’infrastructures critiques, omniprésente dans les travaux anglo-saxons actuels contrairement à la notion de réseaux techniques qui est plutôt usitée dans un contexte français. Les infrastructures critiques sont définies de façon assez consensuelle par le fait que leur indisponibilité soudaine peut entraîner des pertes de vies, des conséquences graves pour l’économie, la santé ou la sécurité des citoyens (Yusta et al., 2011). Cela rejoint le sens de l’origine étymologique grecque *kritikos* qui signifie « difficile, décisif ».

Cette notion d’infrastructure critique est apparue dans les textes officiels à la fin des années 1990, avec notamment des directives présidentielles états-uniennes (Clinton, 1995; White House, 1998) à la suite de divers attentats (voiture piégée dans le parking du World Trade Center à New York en 1993,

camion piégé près d'un bâtiment fédéral d'Oklahoma City en 1995, gaz sarin dans le métro de Tokyo en 1995...), même si elle n'était au départ pas définie clairement. Le concept d'infrastructure critique s'est ensuite exporté en dehors des États-Unis et nous observons des réflexions et des travaux sur le sujet depuis le milieu des années 2000 dans les pays développés à économie de marché (PDEM, (Rist, 2013)) (Galland, 2010).

La recherche académique et opérationnelle autour du concept anglo-saxon de « critical infrastructures » est par ailleurs en plein développement. Le terme d'infrastructure critique en est la traduction littérale, mais le terme d'infrastructure essentielle est également utilisé dans le contexte francophone, notamment au Québec (Petit, 2009; Robert & Morabito, 2009). Ainsi, les premiers articles scientifiques consacrés à ce type d'infrastructures ont été publiés dans des revues générales consacrées à la sécurité ou des revues techniques de génie civil, alors que depuis le milieu des années 2000 plusieurs revues sont entièrement dédiées à ce sujet (Galland, 2010). Il convient cependant de noter que la question de la protection des enjeux majeurs (dont ces infrastructures font partie) est depuis longtemps étudiée, notamment en géographie.

Les instances européennes se sont quant à elles emparées du sujet à la suite des attentats terroristes (gare de Madrid en 2004, bus et métro de Londres en 2005), ce qui a abouti entre autres au Livre vert sur un Programme Européen de Protection des Infrastructures Critiques (Livre Vert Sur Un Programme Européen de Protection Des Infrastructures Critiques, 2005). La directive du conseil européen sur la désignation et la protection des infrastructures critiques européennes du 8 décembre 2008 instaure ensuite un mécanisme visant à identifier les infrastructures critiques à l'échelle européenne (c'est-à-dire dont l'impact serait ressenti par au moins deux états membres) dans les secteurs de l'énergie et des transports (European Council Directive 2008/114/EC of 8 December 2008 on the Identification and Designation of European Critical Infrastructures and the Assessment of the Need to Improve Their Protection, 2008). 78 infrastructures critiques européennes ont ainsi été recensées, et illustrent les relations de dépendance entre les états membres et les opérateurs européens.

Galland estime très justement que « la notion d'infrastructure critique s'est imposée avec force, dans toute son imprécision et ses variantes nationales, comme une manière de formuler un ensemble de questions nouvelles posées aux pays industrialisés » (Galland, 2010). Le terme fait aujourd'hui l'objet de plusieurs interprétations et définitions gouvernementales à travers le monde, dont le

Tableau 2 à la page suivante propose un aperçu. Ces définitions officielles varient selon les pays ou institutions, et la hiérarchie des risques et des menaces associées varie également parfois de façon implicite (Galland, 2010). Il convient ici de soulever l'imprécision de l'utilisation du terme « d'infrastructure » dans ce contexte, qui peut renvoyer à des objets physiques très variés (Bouchon, 2011), que ce soit un « système », un « réseau », voire une « organisation », et qui ne relève pas d'une granularité propre (Rey, 2015).

Certains pays mettent l'accent sur la finalité de l'infrastructure (l'infrastructure est critique car elle remplit une fonction vitale pour la société), tandis que d'autres soulignent plutôt les effets de la perturbation d'une infrastructure donnée sur la société (c'est-à-dire que l'infrastructure est critique car sa perte serait extrêmement perturbante) (NATO, 2007). La dernière approche est plus répandue, mais la première est préférée dans certains pays, comme la France. C'est alors l'Instruction Générale Interministérielle relative à la sécurité des secteurs d'importance vitale (SIV) du 7 janvier 2014 (Instruction Générale Interministérielle N° 6600/SGDSN/PSE/PSN Relative à La Sécurité Des Activités d'importance Vitale (SAIV), 2014) qui définit les concepts d'activité d'importance vitale mais aussi de

point d'importance vitale (voir la définition dans le tableau ci-dessus). L'accent est mis sur les opérateurs et les activités plutôt que sur les infrastructures en elles-mêmes.

Tableau 2 : Définitions d'infrastructures critiques ou des termes équivalents en vigueur dans quelques pays.  
Source : (Ollinger, 2007)

|                  | Terminologie                      | Définition   |
|------------------|-----------------------------------|--|
| France           | Point d'importance vitale         | Etablissement, ouvrage ou installation dont le dommage ou l'indisponibilité ou la destruction par suite d'un acte de malveillance, de sabotage ou de terrorisme risquerait, directement ou indirectement : d'obérer gravement le potentiel de guerre ou économique, la sécurité ou la capacité de survie de la nation ; ou de mettre gravement en cause la santé ou la vie de la population.                                 |
| Allemagne        | Infrastructure critique           | Des organisations ou installations qui ont une importance particulière pour la communauté nationale et dont la défaillance ou la perturbation créerait des goulets d'étranglement durables dans l'approvisionnement, des dysfonctionnements importants de la sécurité publique ou d'autres conséquences dramatiques.   |
| Royaume-Uni      | Infrastructure nationale critique | Les biens, services et systèmes qui servent de support à la vie économique, politique et sociale du Royaume-Uni et dont l'importance est telle que toute perte totale ou partielle ou perturbation pourrait entraîner la perte de nombreuses vies, avoir un sérieux impact sur l'économie nationale, avoir d'autres conséquences graves pour la communauté nationale, ou concerner directement le gouvernement de la nation. |
| Union-Européenne | Infrastructure critique           | Les actifs ou éléments d'actifs qui sont indispensables au maintien des fonctions sociétales critiques notamment la chaîne d'approvisionnement, la santé, la sécurité et le bien-être économique ou social des citoyens.   |
| Etats-Unis       | Infrastructure critique           | Les systèmes et les biens, physiques ou virtuels, qui sont si vitaux pour les Etats-Unis que l'incapacité ou la destruction de tels systèmes ou biens aurait un effet débilant sur la sécurité économique nationale, la santé publique nationale ou la sûreté, ou toute combinaison de ces questions.  |
| Canada           | Infrastructure essentielle        | Les installations matérielles et informatiques, les réseaux, les services et les biens matériels dont la perturbation ou la destruction aurait de sérieuses conséquences pour la santé, la sécurité ou le bien-être économique des Canadiens et Canadiennes, ou pour le fonctionnement efficace des gouvernements au Canada.   |

Finalement, il apparaît que l'hétérogénéité des définitions de la notion d'infrastructures critiques ou essentielles dans un contexte international peut rendre complexe l'utilisation de ce terme. En conséquence de ces divergences, les infrastructures identifiées comme critiques ou essentielles diffèrent d'un contexte à l'autre. Le Tableau 3 ci-dessous reprend les listes des secteurs d'infrastructures critiques officiels identifiés parmi les différents documents de référence pour les Etats-Unis, l'Union Européenne et la France. Nous proposons dans la quatrième colonne le positionnement des réseaux techniques urbains que nous avons identifiés plus haut pour interroger une potentielle concordance.

Tableau 3 : Listes des secteurs d'infrastructures critiques identifiés dans (White House, 2013), (European Council Directive 2008/114/EC of 8 December 2008 on the Identification and Designation of European Critical Infrastructures and the Assessment of the Need to Improve Their Protection, 2008), et (Instruction Générale Interministérielle N° 6600/SGDSN/PSE/PSN Relative à La Sécurité Des Activités d'importance Vitale (SAIV), 2014).

| Secteurs d'infrastructures critiques étasuniennes | Secteurs d'infrastructures critiques européennes | Secteurs d'importance vitale français                    | Positionnement des réseaux techniques urbains                             |
|---|--|--|---|
| Chimie  |  |  |   |
| Installations commerciales                        |  |  |   |
| Communications                                    |  | Communications électroniques, audiovisuel et information | Réseaux de télécommunications (téléphonie et internet)                    |
| Fabrication critique                              |  | Industrie  |   |
| Barrages  |  |  |   |
| Services d'urgence                                |  |  |   |
| Informatique                                      |  |  |   |
| Nucléaire   |  |  |   |
| Alimentation et agriculture                       |  | Alimentation   |   |
| Industrie de la défense                           |  |  |   |
| Energie   | Energie  | Energie  | Réseaux d'énergie (électricité, gaz, hydrocarbures, fluides calorifiques) |
| Santé   |  | Santé  |   |
| Finance et banque                                 |  | Finances   |   |
| Eau et eaux usées                                 |  | Gestion de l'eau   | Réseaux d'eau potable et d'assainissement                                 |
| Installations gouvernementales                    |  | Activités civiles, judiciaires et militaires de l'Etat   |   |
| Transport   | Transport  | Transports   | Réseaux de transport (routier et ferré)                                   |
|   |  | Espace et recherche                                      |   |

La directive étasunienne, nation pionnière dans la protection de ses infrastructures critiques, identifie de nombreux secteurs critiques, tandis que la directive européenne se concentre sur l'énergie et les transports, en les détaillant en sous-catégories. L'Instruction Générale Interministérielle française se révèle quant à elle plus variée que la directive européenne, en restant sur des secteurs d'activité assez généraux. Si nous souhaitons positionner nos objets d'étude qui sont les réseaux urbains au sein de cette catégorisation, nous pourrions aisément placer la majorité de ceux que nous avons identifiés plus haut, à l'exception du réseau de gestion des déchets, qui est d'ailleurs souvent négligé par ce genre de travaux (cf. Tableau 3). Les réseaux de télécommunications se positionneraient dans le secteur « Communications », les réseaux d'électricité, de gaz, d'hydrocarbures et de fluides calorifiques se rangeraient dans la catégorie « Energie », les réseaux d'eau potable et d'assainissement dans la catégorie « Gestion de l'eau » tandis que les réseaux de transport ferré et routier pourraient correspondre au secteur « Transports ».

La répartition des opérateurs d'importance vitale (OIV) mise à jour en 2016 par le Secrétariat Général à la Défense Nationale (SGDN) est présentée dans la Figure 4, et illustre l'importance des secteurs regroupant les réseaux techniques urbains, qui représentent la moitié de la totalité des opérateurs déclarés d'importance vitale. Ce type d'approche est centré sur les infrastructures ponctuelles qui pourraient entraîner des impacts et des conséquences importantes pour l'état et ses habitants, et ce de façon indépendante des aléas. Galland estimait d'ailleurs qu'« [...] une infrastructure n'est pas critique en elle-même. Sa criticité est fonction de l'impossibilité des sociétés à faire face à son dysfonctionnement. » (Galland, 2010). Une infrastructure est finalement jugée critique, ou d'« importance vitale », quelle que soit son exposition à un aléa particulier.

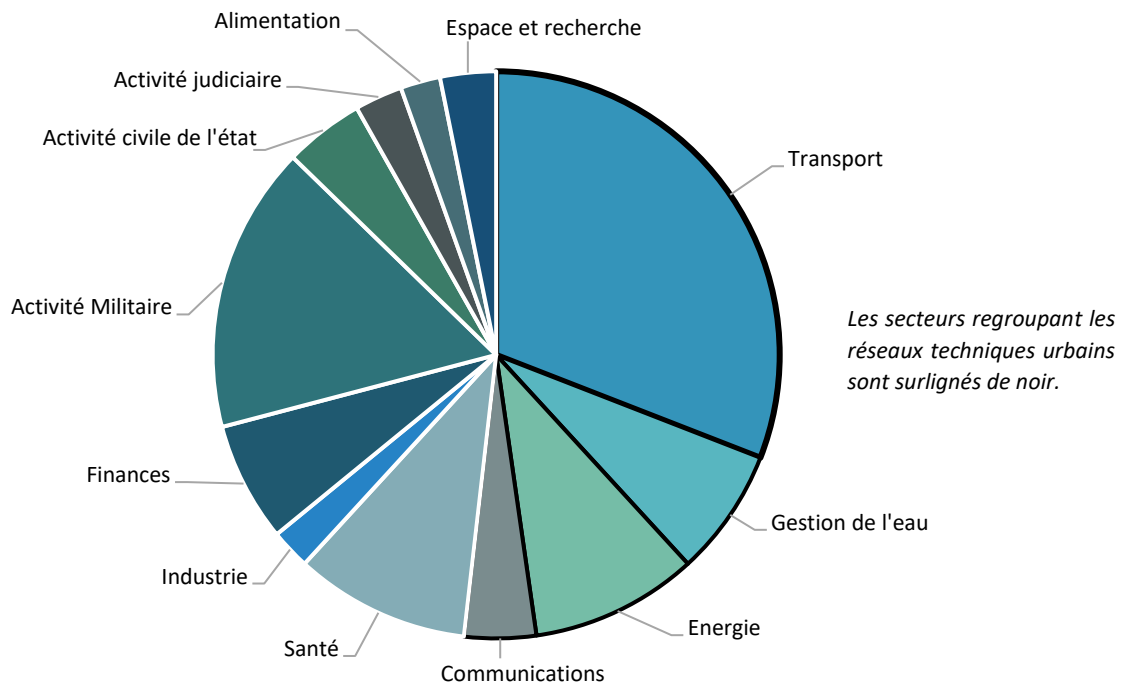


Figure 4 : Répartition des OIV selon les secteurs (SAIV). Source des données : (SGDSN, 2016).

Bien que l'étude de ces points d'importance vitale facilite l'estimation des conséquences de la défaillance d'un réseau (Grangeat, 2017), il ne semble cependant pas pertinent dans le cadre de cette recherche de se focaliser sur ces infrastructures critiques, ou points d'importance vitale, et ce pour plusieurs raisons :

- Le fonctionnement d'un réseau, de par sa définition, sa structure, mais aussi de par son mode d'organisation et de fonctionnement, est déterminé par l'ensemble de ses sous-réseaux, composants, et infrastructures et de leurs interactions.
- Les phénomènes de dépendances peuvent avoir lieu entre deux infrastructures critiques mais aussi entre un composant lambda et une infrastructure critique, voire entre deux composants lambda dont la défaillance entraîne finalement de graves conséquences.
- Les définitions de ce terme pouvant varier de façon importante selon les contextes, et les infrastructures reconnues comme critiques n'étant pas partagées par tous, il semble plus pertinent de se concentrer sur les réseaux techniques urbains, qui sont facilement identifiés dans toutes les villes à travers le monde. Nous les identifions d'ailleurs par leur nature et leurs fonctions et non pas par les conséquences de leurs défaillances ou par leur vulnérabilité pour l'instant.

Il n'apparaît donc pas pertinent de se focaliser sur la notion d'infrastructures critiques dans le cadre de notre recherche. Pour les raisons évoquées plus haut et de par notre positionnement dans un contexte français, nous nous concentrerons dans la suite de ces travaux sur les réseaux techniques urbains. Ceux-ci peuvent cependant être considérés comme un ensemble d'infrastructures critiques (au sens international du terme), car ils en possèdent les caractéristiques principales et que leur criticité est avérée (Lhomme, 2012).

Certains auteurs estiment d'ailleurs comme équivalents les termes de « réseaux de support à la vie » (autrement dit les réseaux techniques) et « d'infrastructures essentielles » (synonyme d'infrastructure critique, utilisé de façon officielle au Canada) (Petit, 2009; Robert & Morabito, 2009). Cette possible concordance doit cependant tenir compte des différences d'échelle pouvant intervenir, les réseaux urbains ne faisant pas toujours figure d'enjeu national. Nous pourrions ainsi faire référence par la suite, notamment dans la partie II, à des approches étrangères qui se sont focalisées sur les infrastructures critiques mais que nous considérons comme applicables à nos objets d'étude que sont les réseaux techniques urbains.

### 1.1.3. Une grande diversité de modes d'organisation et de fonctionnement

Les réseaux urbains étudiés, même s'ils se retrouvent sous la même définition exposée plus haut, sont finalement des systèmes très divers, notamment de par leurs fonctions, leurs infrastructures, leurs modes d'organisation, mais aussi leur gouvernance. Les modes de fonctionnement de ces réseaux sont en effet très variés, notamment concernant l'organisation des flux parcourant ces réseaux. Nous avons ainsi des réseaux qui acheminent les flux d'un point de concentration vers les usagers, des réseaux qui acheminent les flux des usagers vers un point de concentration, mais aussi des réseaux qui acheminent des flux d'un usager à un autre, ou d'un point de concentration à un autre comme représenté ci-dessous dans la Figure 5 (MEDD, 2005).

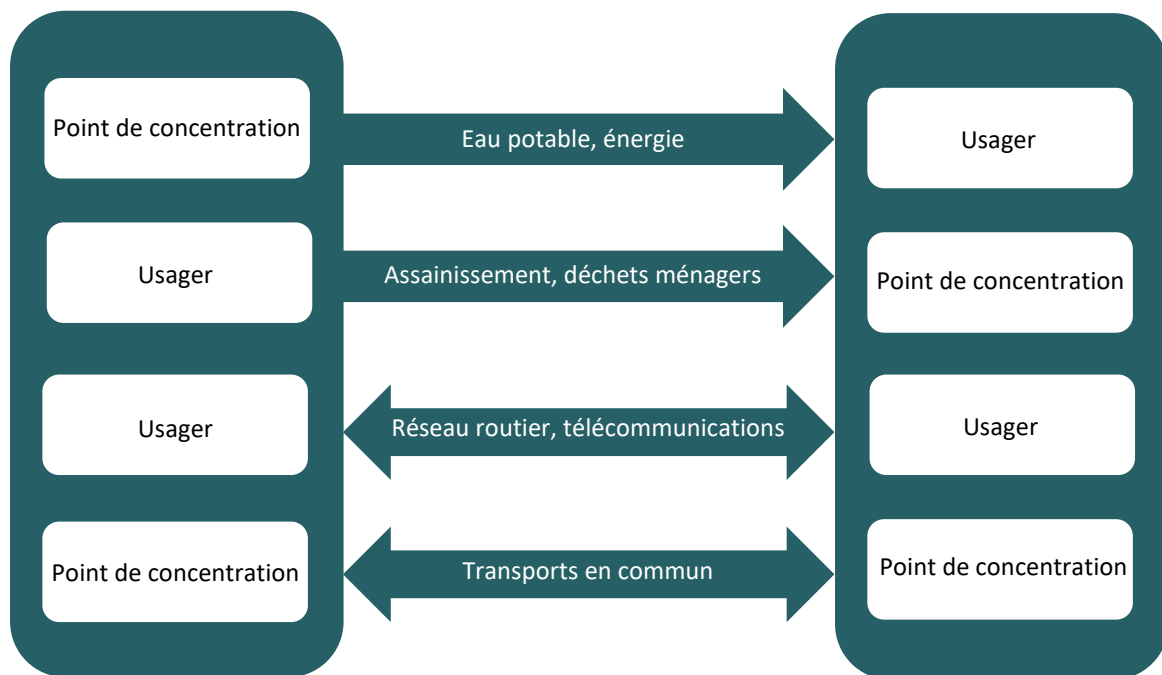


Figure 5 : La diversité de l'organisation des flux au sein des réseaux techniques, repris de (MEDD, 2005)

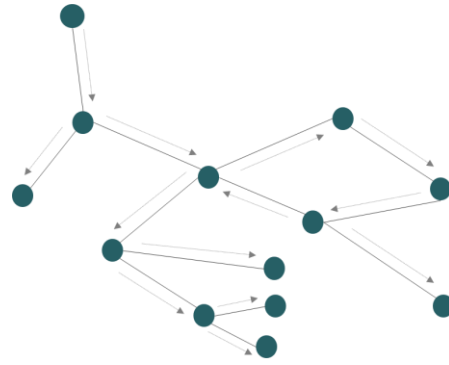
L'homme questionne ainsi la rationalité de ce choix de rassembler ces systèmes si divers au sein d'un même terme (Lhomme, 2012) :

- « 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, 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. »

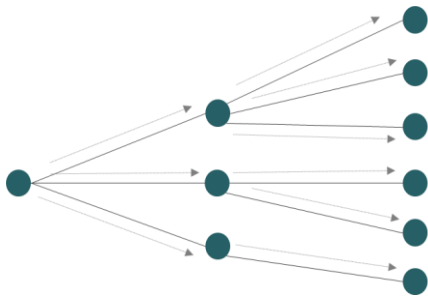
L'étude du dernier point soulevé par Lhomme (2012) nous amène à identifier plus précisément les configurations générales rencontrées au niveau des réseaux techniques urbains. Celles-ci sont listées ci-dessous et représentées par la Figure 6.

- Un réseau hiérarchisé peut avoir une structure quelconque ou spécifique mais ses flux respectent une certaine hiérarchie des liens et des nœuds, avec les sens de circulation correspondants et une impossibilité de réorganisation (configuration A).
- Un réseau arborescent est un réseau où les flux se distribuent depuis un nœud central d'origine vers des nœuds de niveaux inférieurs à la manière des branches d'un arbre (configuration B). Le réseau de distribution d'électricité est un exemple de réseau arborescent.
- Un réseau arborescent inversé est similaire à un réseau arborescent à l'exception que les flux ont pour origine les nœuds des niveaux les plus inférieurs et remontent vers un nœud central de destination (configuration C). Un exemple de réseau arborescent inversé est le réseau d'assainissement.
- Un réseau maillé présente des nœuds reliés les uns aux autres par plusieurs liaisons, ce qui le rend plus souple (configuration D). Un exemple de réseau maillé est le réseau routier.
- Un réseau bouclé est un réseau où les flux se structurent en boucles, en revenant au point de départ après leur circuit (configuration E). Un exemple de réseau bouclé est le réseau de chaleur urbaine.
- Un réseau étoile est un réseau qui possède des nœuds centraux, connectés à tous les nœuds de niveau inférieur un par un (configuration F). Un exemple de réseau étoilé est le réseau Ethernet.
- Un réseau étoilé inversé présente la même structure qu'un réseau étoilé mais les flux vont des branches de l'étoile vers le cœur de l'étoile (configuration G).





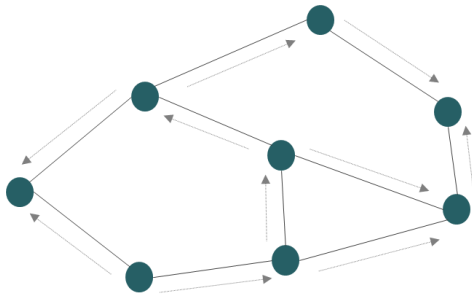
A : Un réseau hiérarchisé



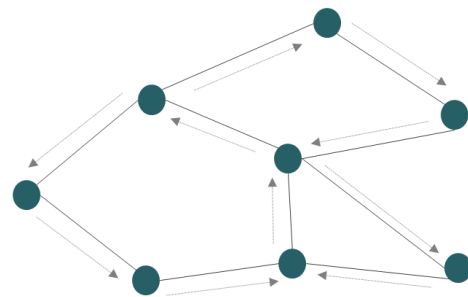
B : Un réseau arborescent



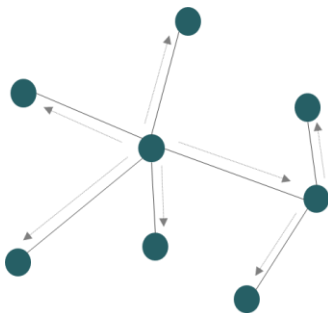
C : Un réseau arborescent inversé



D : Un réseau maillé



E : Un réseau bouclé



F : Un réseau étoilé



G : Un réseau étoilé inversé

Figure 6 : Représentation schématique des topologies des réseaux techniques urbains.

Nous rappelons que les nœuds et les arcs représentés sur les schémas ci-dessus correspondent en fait à des infrastructures nodales et linéaires très diverses également, présentées plus haut. Nous illustrons plus précisément la diversité de ces réseaux – qui va compliquer l'étude et la modélisation harmonisée de ceux-ci - avec un tableau récapitulatif synthétisant les différentes caractéristiques des 10 réseaux étudiés à la fin du chapitre 1 Cette synthèse présente entre autres les fonctions, les sous-réseaux, les infrastructures composant ces réseaux, et leur configuration en règle générale.

#### 1.1.4. Des systèmes indispensables au fonctionnement de la ville, notamment pendant une crise

L'importance des réseaux urbains et des infrastructures qui les composent est aujourd'hui avérée et documentée. De nombreux documents de la littérature grise tels que des directives, des plans de protection, des stratégies, des livres verts démontrent l'intérêt porté notamment par les institutions gouvernementales à ces objets, et la nécessité de leur étude, leur prise en compte et leur protection. L'importance de ces objets –que ce soit en temps de crise ou non- est également démontrée par plusieurs arguments :

- En temps normal, les villes d'aujourd'hui sont très fortement dépendantes du bon fonctionnement des services urbains qui reposent sur les réseaux techniques urbains et leurs infrastructures.
- En temps de crise, les services urbains se révèlent également centraux dans les processus d'évacuation (transports, télécommunications...) ou de maintien sur place pour les habitants (eau, électricité...).
- Les réseaux peuvent également se révéler des vecteurs de propagation de la crise et des impacts engendrés voire des générateurs de perturbations, notamment par le biais des phénomènes de défaillances en cascade et du fait de la dépendance des populations à ces services (Blancher, 1998).
- En temps de relèvement post-crise, la restauration des réseaux et des infrastructures critiques peuvent conditionner fortement les processus de récupération et de retour à la normale (Lhomme, 2012).

L'étude des retours d'expériences de différentes catastrophes autour du monde soulignent d'ailleurs l'importance du rôle joué par ces réseaux durant les différents états du système urbain, comme exposé par différents travaux (Lhomme, 2012; Pottier et al., 2019). Ce point sera détaillé dans le chapitre 3. Certains réseaux semblent plus critiques que d'autres, et impactent par leur perturbation de façon plus importante la société. Ce phénomène se ressent d'ailleurs logiquement dans la proportion des travaux se rapportant à ces réseaux plus critiques, comme l'électricité par exemple (Yusta et al., 2011).

## 1.2. DES SYSTEMES EXPOSES AUX ALEAS ET DEPENDANTS LES UNS DES AUTRES

Les réseaux techniques urbains sont exposés à différents aléas, et présentent différents types de vulnérabilités, que nous présentons ci-dessous. Nous introduisons à cette occasion ce que nous pouvons considérer comme une catégorie de vulnérabilité externe particulière et qui sera au centre de nos préoccupations : les (inter)dépendances à l'intérieur de ces réseaux mais aussi entre ces réseaux. Ces phénomènes sont ici explicités et caractérisés, et une typologie est présentée.

### 1.2.1. Vulnérabilité et exposition des réseaux techniques urbains

La vulnérabilité définit couramment le caractère vulnérable d'une entité, qui est alors fragile si exposée à un risque. Elle peut être définie comme une grandeur permettant de quantifier l'impact d'un phénomène (un aléa) sur des enjeux (Gleyze, 2005). L'analyse de la vulnérabilité nécessite alors de caractériser cet aléa mais aussi la réaction des enjeux soumis à celui-ci. Le Conseil Général du Développement Durable définit quant à lui la vulnérabilité d'un enjeu comme une mesure de l'amplitude des effets (présence humaine, activités économiques, etc.) face à un aléa donné (CGEDD, 2013). La vulnérabilité peut également être définie en tant que défaut ou faiblesse dans la conception, la mise en œuvre, l'exploitation ou la gestion d'un système ou de ses composants, qui le rend susceptible d'être détruit, incapable de fonctionner ou de se rétablir lorsqu'il est exposé à un danger ou une menace (Eusgeld et al., 2011a).

Cette vision classique de la vulnérabilité consiste donc à mesurer l'endommagement ou le dysfonctionnement potentiel des éléments exposés. Une autre vision se voulant plus intégrée a ensuite fait son apparition, qui vise elle à identifier les conditions et facteurs favorables aux endommagements du système étudié ou influant sur sa capacité de réponse face à une situation de crise (Thouret & D'Ercole, 1996). L'analyse de ces éléments peut alors permettre de prévoir l'amplitude des dégâts potentiels.

La complexité de cette notion a notamment pour origine son caractère multidimensionnel et l'hétérogénéité des objets qu'elle affecte. Bien que les classifications plus ou moins formalisées des facteurs de vulnérabilité des réseaux techniques soient souvent imparfaites, en particulier pour des approches multi-aléas, nous choisissons ici de présenter une approche générique qui nous semble pertinente. D'après D'Ercole et Metzger (2009), la vulnérabilité peut être déclinée grâce à six catégories d'analyse, correspondant à différentes dimensions de ce qui peut rendre un enjeu vulnérable :

1. La vulnérabilité « intrinsèque » : ce sont les faiblesses propres qui caractérisent chaque enjeu (par exemple : le faible niveau socioéconomique de la population, l'ancienneté des installations, les déficiences des composants des systèmes techniques, la mauvaise qualité du bâti).
2. L'exposition de l'enjeu aux aléas d'origine naturelle (un séisme, une éruption volcanique...) ou anthropique (stockage et circulation des produits dangereux...) et sa susceptibilité d'endommagement. Il s'agit ici de considérer tous les aléas existants. La susceptibilité d'endommagement permet de prendre en compte le fait que les enjeux sont plus ou moins sensibles à certains aléas (par exemple : une conduite d'eau enterrée n'est pas sensible aux chutes de cendres volcaniques).
3. La dépendance : il s'agit ici de relever tout ce dont dépend un enjeu pour fonctionner car le fait que son fonctionnement soit dépendant d'autres éléments ou systèmes contribue à sa vulnérabilité (par exemple, la dépendance des stations de pompage du réseau d'approvisionnement en eau vis-à-vis du système électrique).
4. La capacité de contrôle : la vulnérabilité d'un enjeu est moindre s'il existe une capacité à détecter les problèmes et à intervenir pour tenter de les résoudre ; la capacité de contrôle peut s'apprécier de différentes manières, en considérant l'existence de systèmes de

communications, d'un télécontrôle, la présence de personnel qualifié, l'accessibilité des installations par voie terrestre, etc.

5. Les alternatives de fonctionnement : la vulnérabilité d'un enjeu est d'autant plus grande que les alternatives à son fonctionnement sont limitées (par ex. : une station de potabilisation pouvant compter sur plusieurs sources d'eau est moins vulnérable que celle qui dépend d'un seul captage).
6. Le niveau de préparation à la gestion des crises. Il est difficilement envisageable d'éliminer tout à fait les formes de vulnérabilité qui précèdent. Le niveau de préparation à la gestion des situations d'urgence (plans de gestion de crises, exercices d'évacuations, simulations, systèmes de communication d'urgence, etc.) doit donc permettre de faire face à ce type de situation, ce qui est une manière de contrebalancer les autres formes de vulnérabilité. »

Ces catégories ont été reprises et représentées de façon schématique dans la Figure 7 ci-dessous.

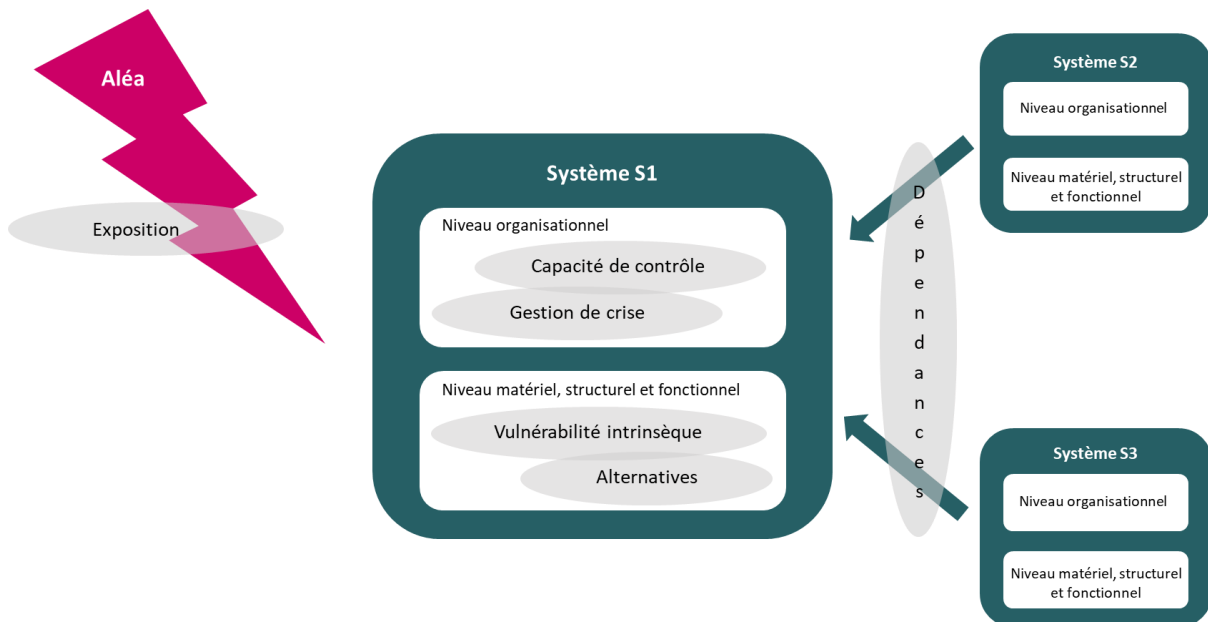


Figure 7 : Les différentes catégories d'analyse de la vulnérabilité d'un système, adapté des écrits de (D'Ercole & Metzger, 2009).

Cette analyse de la vulnérabilité peut être appliquée à tous les types d'enjeux, dont logiquement les réseaux techniques urbains, sous condition d'identifier pour chacun les variables permettant l'évaluation des dimensions de leur vulnérabilité.

Concernant les aléas auxquels nos objets d'étude - les réseaux techniques urbains - sont exposés, nous distinguons les aléas naturels (séismes, inondations, canicule, tempêtes...) et les aléas anthropiques (actes de sabotage, erreurs humaines, retards de livraison, grèves...), mais nous pouvons aussi distinguer les aléas internes où les causes du dysfonctionnement sont propres au réseau étudié (erreurs humaines d'un agent) et les aléas externes où les causes du dysfonctionnement sont extérieures au réseau étudié (défaillance d'un sous-traitant). Les aléas naturels peuvent impacter fortement les différents réseaux, comme présenté de façon très simplifiée et schématique dans le Tableau 4 par le CGEDD, et sont donc étudiés de façon importante.

Tableau 4 : Classement des vulnérabilités des réseaux techniques vis-à-vis des aléas naturels. Source : (CGEDD, 2013).

|                              | Réseau routier | Réseau ferré (infras) | Réseau ferré (signalisation et SI) | Ligne électrique aérienne | Ligne HT enterrée | Réseau de distribution électrique enfoui | Gazoduc enterré |
|------------------------------|----------------|-----------------------|------------------------------------|---------------------------|-------------------|--|-----------------|
| Crue et inondation en plaine | **             | **                    | **                                 |                           | *                 | *  | *               |
| Tempête de vent              | *              | *                     | **                                 | ***                       |                   | *  |                 |
| Houle, surcote marine        | *              | *                     | *                                  |                           |                   |  |                 |
| Séisme                       | **             | **                    |                                    | *                         |                   | *  |                 |
| Inondation rapide            | ***            | **                    | **                                 | *                         | *                 |  | *               |
| Neige exceptionnelle         | **             | **                    | *                                  | **                        |                   | *  |                 |
| Tsunami                      | **             | **                    | *                                  | *                         |                   |  |                 |
| Grand froid                  | *              | *                     | *                                  |                           |                   | **                                       |                 |
| Canicule                     |                |                       | **                                 |                           |                   | *  |                 |
| Chutes de blocs              | **             | **                    |                                    | *                         | *                 | *  |                 |
| Effondrement                 | *              | **                    |                                    |                           |                   | *  | *               |
| Avalanche                    | **             | **                    | *                                  | *                         |                   | *  |                 |

Légende : \*\*\* : très vulnérable ; \*\* : vulnérable ; \* : peu vulnérable ; ∅ : non vulnérable

Mais comme énoncé précédemment, les réseaux techniques sont également exposés à différents aléas anthropiques parfois plus difficiles à appréhender. Lhomme (2012) dresse ainsi une liste des aléas potentiels :

- « 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... »

Et selon la façon dont ces réseaux sont définis et les limites prises en compte, certains aléas comme les aléas politiques peuvent être considérés comme externes ou internes. Certains auteurs préfèrent

cependant dépasser la dichotomie aléa-vulnérabilité, et Lhomme (2012) propose par exemple le recours au concept de « risque réseau », qui englobe tous les éléments liés à ces deux notions, tels que l'endommagement, le dysfonctionnement, les conséquences, mais aussi les aléas engendrés par les dysfonctionnements des réseaux etc. Ce concept systémique de « risque réseau » est schématisé ci-dessous dans la Figure 8.

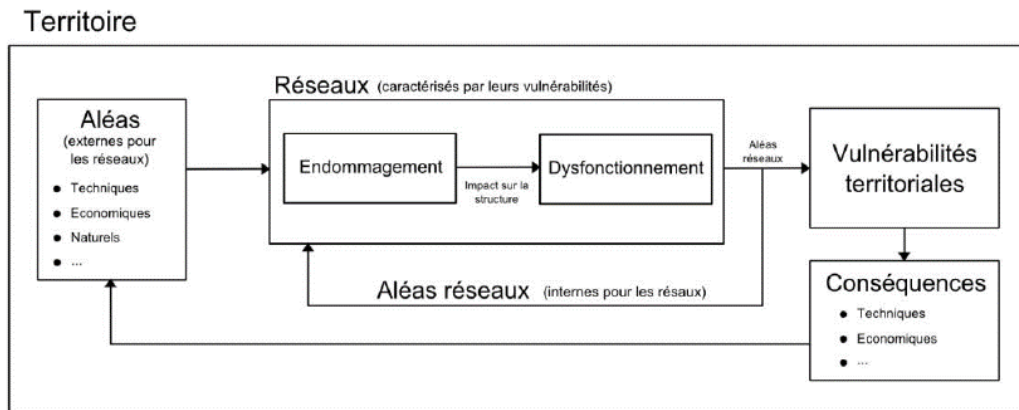


Figure 8 : Illustration du concept de "risques réseaux". Source : (Lhomme, 2012)

La complexité de la notion de vulnérabilité est notamment illustrée dans la façon dont elle est étudiée. Nous observons par exemple que les dépendances d'un système donné à d'autres systèmes sont parfois considérées comme une catégorie de vulnérabilités externes, ou parfois comme des facteurs externes à la notion de vulnérabilité. Nous faisons le choix pour la suite de ces travaux de considérer les dépendances comme une des composantes de la vulnérabilité d'un système, comme illustré par la Figure 7.

### 1.2.2. Les phénomènes d'(inter)dépendances parmi les réseaux techniques urbains et leurs infrastructures

Une dépendance entre deux systèmes se traduit par la capacité d'un système à influencer sur l'état de l'autre système. Ainsi, l'infrastructure A dépend de l'infrastructure B lorsqu'un changement d'état dans cette dernière a la capacité d'influencer (par exemple modifier) certains états (par exemple les comportements) de l'infrastructure A. Un exemple de dépendance est le feu tricolore de signalisation qui dépend d'une alimentation électrique pour fonctionner et afficher un feu coloré. Si l'alimentation électrique est coupée, le feu ne peut remplir sa fonction de régulation du trafic routier. Une dépendance est donc une relation unidirectionnelle. Une interdépendance apparaît quant à elle lorsque la relation de dépendance est bidirectionnelle, et que l'état de chaque infrastructure influence l'état de l'autre. Par conséquent, les infrastructures A et B sont interdépendantes si A dépend de B et que, dans le même temps, B dépend de A. Nous notons que la présence d'interdépendance crée des boucles d'influence réciproque. Ces concepts sont illustrés par la Figure 9.

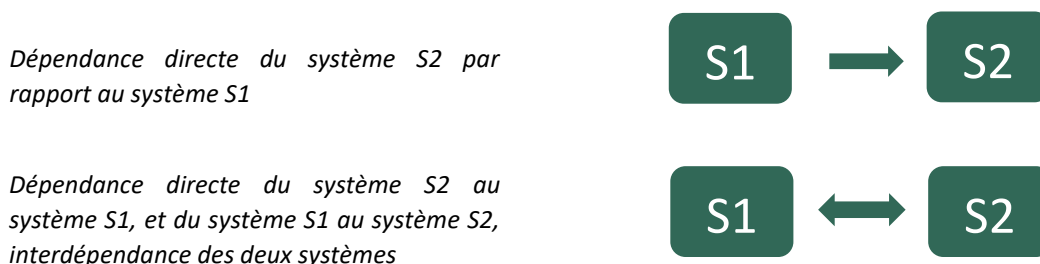


Figure 9 : Illustration des liens de dépendance et d'interdépendance entre deux systèmes

Un exemple d'interdépendance peut être le lien de dépendance réciproque entre les systèmes de distribution électrique et les systèmes de télécommunications. En effet, la distribution d'électricité est dépendante de ses systèmes de télégestion et de télécontrôle, mais ces systèmes de télécommunications sont eux-mêmes dépendants de leur alimentation électrique pour fonctionner. Une interdépendance peut être qualifiée d'interne ou d'externe, selon qu'elle survient au sein d'un même système ou entre deux systèmes. Nous précisons cependant que cette notion d'internalité dépend de la définition des contours des systèmes étudiés. En effet, selon la granularité à laquelle on se place, un même lien d'interdépendance peut être défini soit comme interne à un système englobant plusieurs sous-système, soit comme externe pour les deux sous-systèmes considérés. Par exemple, si nous considérons le réseau de distribution d'eau potable, la dépendance entre les vannes et les pompes et leur système de télégestion peut être considérée comme interne si nous nous plaçons au niveau du système de distribution d'eau potable ou comme externe si nous nous plaçons au niveau des sous-systèmes cités.

Certains estiment qu'une interdépendance entre deux infrastructures peut correspondre à toutes les liaisons qui rendent nécessaire une infrastructure à une autre et réciproquement, et qu'il faut donc restreindre ce terme pour les travaux de recherche, en considérant seulement les interactions - plus ou moins explicites - pouvant aboutir à des défaillances (Rozel, 2009). Une analyse empirique d'un ensemble de données sur les incidents de perturbations des infrastructures critiques a montré que les interdépendances en tant que telles sont rares (Luijff et al., 2010 ; Van Eeten et al., 2011).

Ces analyses montrent que les seules **interdépendances** mentionnées notamment dans les articles de presse se produisent à un niveau d'abstraction et une granularité inférieure que celle des infrastructures critiques, par exemple à l'échelle de certains composants spécifiques. Nous n'observons en effet que peu de situations où A dépend de B, B dépend de A et où la perturbation de A entraîne l'interruption de B, ce qui empêche A de récupérer, car les fonctions critiques de B sont perturbées. **Nous proposons donc de mentionner entre parenthèses la possibilité d'(inter)dépendances, en soulignant que ces phénomènes restent rares et que ce sont plutôt des dépendances qui sont observées pour une échelle et une granularité donnée.**

Nous allons par contre tenter d'identifier et d'analyser les différents types de dépendances existant entre des éléments de réseaux techniques urbains. Concernant les typologies d'(inter)dépendances, nous nous devons de citer le travail de Rinaldi, Peerenboom et Terrence (2001), qui a abouti à la proposition d'un cadre conceptuel pour l'identification et l'analyse des (inter)dépendances qui a eu une influence majeure dans ce domaine de recherche (Rinaldi et al., 2001). Les auteurs identifient ainsi quatre catégories d'interdépendances (qu'ils qualifient toujours d'**interdépendances**) :

- les interdépendances physiques, qui regroupent les liens matériels et physiques entre les sorties d'une infrastructure et les entrées d'une autre
- les interdépendances cybernétiques, qui regroupent les liens basés sur une transmission d'informations
- les interdépendances géographiques, qui regroupent les liens de proximité entre un événement dans l'environnement géographique et toutes les infrastructures voisines
- les interdépendances logiques, qui regroupent en fait les liens d'interdépendance qui ne rentrent dans aucune des catégories précédentes

Toubin (2014), auteure d'une thèse sur les processus d'amélioration de la résilience urbaine par les diagnostics collaboratifs et dont le cas d'étude était les services urbains parisiens face à l'inondation,

avait cependant décidé de seulement différencier les interdépendances fonctionnelles et les interdépendances géographiques ou spatiales, en se basant entre autres sur les travaux de (Zimmerman, 2002). Elle considérait en effet que les interdépendances cybernétiques et logiques sont incluses dans les interdépendances fonctionnelles puisqu'elles correspondent bien à l'échange d'une « réalité » (ici une information) portée par un réseau urbain de télécommunications. À l'inverse, les interdépendances géographiques sont dues à la proximité (voire le partage pour certains conduites) des infrastructures (Blancher, 1998).

Dutozia (Dutozia, 2013) complète quant à lui la liste des liens identifiés par (Rinaldi et al., 2001) par l'existence de liens « politiques ou de gouvernance », ou encore de liens « sociétaux » qui peuvent être inclus dans la catégorie des interdépendances logiques. Nous pouvons également évoquer les potentiels liens économiques entre les réseaux. Comme Zimmerman le souligne, nous observons que les (inter)dépendances se produisent à différents niveaux d'organisation du système (Zimmerman, 2002) et que ces liens politiques ou économiques se jouent plutôt à l'échelle du réseau en tant que système complexe plutôt qu'au niveau des infrastructures techniques. La notion d'interdépendance géographique qui stipule que « les infrastructures sont géographiquement interdépendantes si un événement dans l'environnement local peut créer des changements d'état dans chacune d'entre elles » (Rinaldi et al., 2001) fait l'objet de différentes critiques. En effet, il semble pour certains que les interdépendances géographiques ne soient que la conséquence de défaillances de mode commun (Nieuwenhuijs et al., 2008; Setola et al., 2017). Ces défaillances de mode commun seront explicitées plus loin dans la partie consacrée aux différents types d'enchaînements de défaillances, mais nous pouvons les définir comme les défaillances simultanées de deux systèmes différents suite à une cause commune. Les auteurs ajoutent également une nouvelle catégorie de dépendances : les dépendances sociales, notamment causées par les comportements humains (réaction de panique, systèmes de communications débordés...).

Nous faisons finalement le choix de considérer les quatre catégories d'(inter)dépendances suivantes, en se basant sur les différents travaux et discussions cités, que nous explicitons avec des exemples simples :

- (Inter)dépendance physique : L'état de l'infrastructure A dépend d'une sortie matérielle de l'infrastructure B (une pompe hydraulique est dépendante de son alimentation en électricité).
- (Inter)dépendance cybernétique : L'état de l'infrastructure A dépend d'informations transmises par l'infrastructure B via un système d'informations (un feu de signalisation du réseau de métro est dépendant de ses commandes centralisées).
- (Inter)dépendance géographique : L'état de l'infrastructure A dépend de l'état de l'infrastructure B par le biais de sa proximité géographique (un câble électrique enterré est dépendant de l'état de la chaussée qui le recouvre). A noter que ces dépendances ne sont pas fonctionnelles, mais dépendent strictement de relations physiques.
- (Inter)dépendance logique ou sociale : L'état de l'infrastructure A dépend de celui de l'infrastructure B par l'intermédiaire d'autres procédés, relatifs notamment aux décisions humaines et aux organisations sociétales comme des réactions de panique, liens politiques, économiques ou financiers (le système de communication est dépendant d'une potentielle réaction de panique entraînant une surcharge de son réseau).

Nous pouvons également différencier les dépendances directes des dépendances indirectes, lorsque la dépendance d'un système S2 à un système S1 est transmise à un système S3 par un maillon



intermédiaire, comme illustré dans la Figure 10. Nous pouvons alors introduire le concept d'ordre, qui indique par incrémentation si les deux systèmes sont directement connectés par une dépendance ou s'ils sont indirectement connectés via un ou plusieurs autres systèmes.

*Dépendance directe du système S1 au système S2 et du système S2 au système S3, dépendance indirecte du système S3 au système S1 (dépendance de deuxième ordre)*



*Dépendance directe du système S2 au système S1, du système S3 au système S2 et du système S1 au système S3, dépendance indirecte du système S3 au système S1, du système S1 au système S2, et du système S2 au système S3, interdépendance des trois systèmes par une boucle de dépendances*

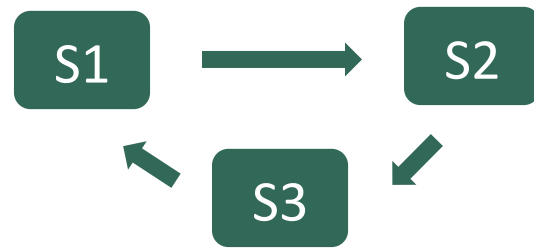


Figure 10 : Exemples de dépendances entre trois systèmes

La notion d'ordre est reprise également dans certains travaux, où est également introduite la notion de boucle de dépendances (Setola et al., 2017). En présence de boucles, nous observons que les conséquences d'un défaut ne peuvent plus être décrites via une arborescence car les conséquences n'ont plus de direction préférentielle, et que les conséquences négatives sur les infrastructures sont exacerbées.

Nos recherches et nos observations nous permettent d'avancer que ces liens de dépendances entre réseaux techniques urbains commencent à être mieux connus et pris en compte par les parties prenantes. La deuxième partie du manuscrit permettra de présenter un panorama des recherches portant sur ces phénomènes et leur étude. Nous pouvons citer quelques exemples assez courants de dépendances identifiées :

- Les réseaux d'alimentation électrique fournissent de l'énergie à d'innombrables systèmes comme les interrupteurs, systèmes de signalisation et d'éclairage, pompes et stations de relevage, mais aussi systèmes de contrôle et de supervision. L'énergie électrique est aussi essentielle pour les télécommunications, et certains systèmes de transport comme le ferré.
- Les réseaux d'approvisionnement en eau fournissent de l'eau à différents systèmes de production et de refroidissement, notamment pour les réseaux d'alimentation électrique, des télécommunications, et des réseaux d'acheminement des fluides énergétiques.
- Les systèmes de transport fournissent des services d'expédition et de livraison sans lesquels d'autres infrastructures et réseaux ne pourraient pas fonctionner. Ils permettent également aux employés d'être disponibles et mobilisables.
- Les réseaux de télécommunications fournissent des services de communication et de télégestion essentiels, ainsi que les systèmes SCADA (contrôle de supervision et acquisition de données) indispensables pour la gestion et la protection des autres réseaux et infrastructures.

Un exemple de recensement des liens de dépendances existants entre les réseaux de transports et les autres réseaux sont représentés schématiquement dans la Figure 11.

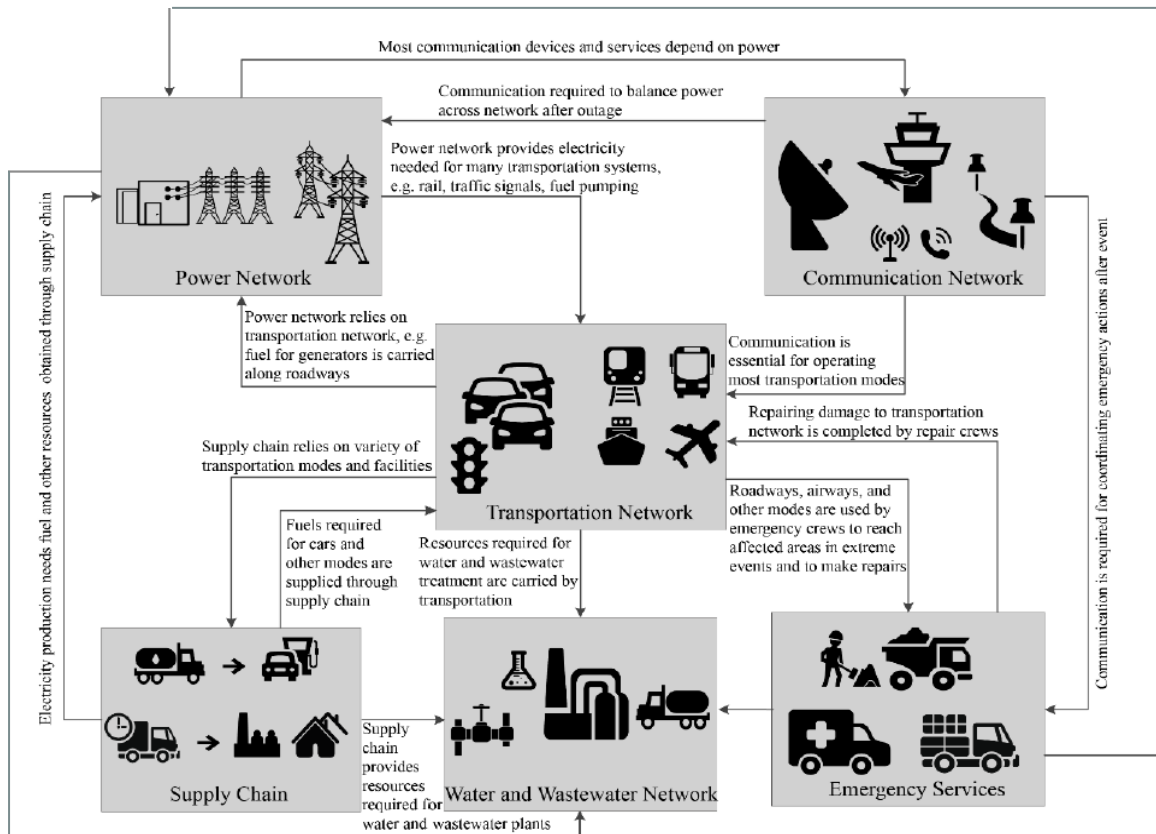


Figure 11 : Identification des liens de dépendances entre le transport et les autres services. Source : (Fotouhi et al., 2017)

Les liens d’(inter)dépendances entre différents systèmes peuvent survenir à plusieurs niveaux de granularité. On observe par exemple des dépendances entre les composants d’une infrastructure, ou bien entre une infrastructure et un réseau technique. Cette question de granularité sera reprise et explicitée dans le chapitre 2.

### 1.2.3. Les dimensions d’analyse des relations d’(inter)dépendance

Une dépendance entre deux systèmes n’est pas un lien fixe et absolu, et ce lien peut comporter des degrés et être influencé par différents facteurs, notamment environnementaux. Nous pouvons ainsi identifier les différentes caractéristiques d’une dépendance, en s’inspirant des divers travaux sur le sujet (Perrow, 2011; Rinaldi et al., 2001; Benoît Rozel, 2009) :

- **Force de la dépendance :** Plus une dépendance est forte, plus les défaillances ont tendance à se propager rapidement via et à travers les systèmes couplés. Cette caractéristique est donc notamment liée aux notions d’autonomie : une usine de production d’eau potable est plus fortement dépendante de ses réactifs qu’une centrale nucléaire de ses combustibles car elle ne peut fonctionner que quelques jours sans nouvelle livraison tandis que la centrale peut continuer à fonctionner plusieurs mois sans nouveau combustible.
- **Ordre de la dépendance :** L’ordre de la dépendance indique si les deux systèmes étudiés sont directement ou indirectement reliés par le lien de dépendance, et ce via un ou plusieurs autres systèmes. Un couplage du premier ordre correspond à une liaison directe, celui du second ordre avec un intermédiaire et ainsi de suite, comme illustré dans la Figure 12.

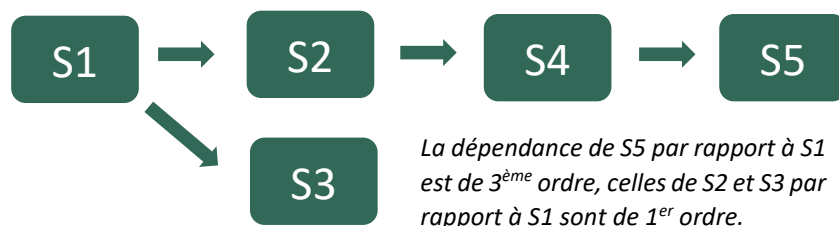


Figure 12 : Illustration de la notion d'ordre de dépendance.

- **Prévisibilité de la dépendance** : Les interactions dites prévisibles sont celles qui ont été identifiées et définies dès la conception du système. Les interactions considérées comme non prévisibles sont celles qui ne sont pas prévues ou attendues, qui ne sont pas visibles ou compréhensibles au premier abord. Ces dernières sont ainsi plus difficiles à détecter et à gérer.
- **Flexibilité de la dépendance** : Une dépendance flexible indique que le système dépendant possède la capacité à apprendre du passé et ainsi à s'adapter aux situations futures. À l'opposé, un système avec un couplage inflexible restera rigide, c'est-à-dire qu'il gardera toujours le même comportement de dépendance quelles que soient les expériences passées.

Les (inter)dépendances peuvent également être caractérisées par d'autres dimensions descriptives, présentées ci-dessous sur la base de différents travaux (Rinaldi et al., 2001, complété par Luijff et al. 2008). Ces caractéristiques sont récapitulées et schématisées dans la

Figure 14 présentée plus loin.

- **Nature de la dépendance** : La nature de la dépendance renseigne sur la catégorie de lien existant entre les deux systèmes. Il peut être physique, cybernétique, géographique ou logique.
- **Environnement des systèmes** : L'environnement des systèmes étudiés et ceux-ci sont interdépendants et ils s'influencent mutuellement. Cet environnement est notamment décrit par le contexte économique, politique, juridique, social, mais aussi par le contexte technique et sécuritaire en place, qui peut influencer sur la relation de dépendance.
- **Caractéristiques des systèmes concernés** : Des éléments concernant les échelles et l'organisation spatiale, les pas de temps fonctionnels, le mode d'organisation, et les procédures opérationnelles permettent d'analyser de façon rigoureuse les systèmes dépendants.
- **Type de défaillance** : Les propagations de défaillances peuvent se faire de différentes façons. Les défaillances en cascade représentent la propagation à la suite d'un évènement initial des impacts sur un système à d'autres systèmes qui sont dépendants du premier. Les défaillances en escalade représentent l'aggravation (en sévérité ou en temps) d'une défaillance préexistante suite à une dépendance à un système perturbé. Les défaillances de cause commune représentent la défaillance simultanée de plusieurs systèmes suite à une même perturbation. Les défaillances de mode commun sont souvent confondues avec les dépendances géographiques. Ces notions seront détaillées plus loin.
- **Etat du système** : Un système face à une perturbation évolue entre plusieurs états, à savoir son état normal de fonctionnement, un état perturbé à partir duquel il peut revenir à la normale ou - si un seuil est dépassé - passer en état de crise, puis un état de récupération

comme illustré par la Figure 13. Les dépendances entre les systèmes peuvent évoluer selon l'état dans lequel se trouvent ces systèmes.

Luijff et al. (2008) estiment d'ailleurs que la plupart des modèles de dépendance entre réseaux et infrastructures critiques actuels négligent de reconnaître plusieurs états de fonctionnement. Ils se concentrent généralement sur l'identification des dépendances dans des conditions de fonctionnement normales, sans pour autant modéliser les dépendances pouvant apparaître dès que l'exploitation d'une infrastructure s'écarte de ces conditions.

La Figure 13 représente les différents états d'un système faisant face à une perturbation. Le système passe alors de son état de fonctionnement normal à un état perturbé. Il peut ensuite retourner à son état normal ou bien évoluer vers un état de crise. Cet état de crise est ensuite suivi d'une phase de récupération, pour finalement revenir à un état normal (qui peut être différent de l'état initial).

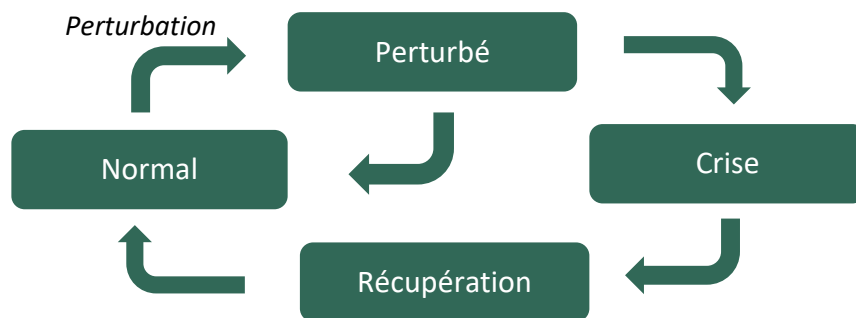


Figure 13 : Les différents états d'un système face à une perturbation

Nieuwenhuijs et al (2008) vont plus loin dans l'analyse et estiment que les dépendances peuvent varier en fonction de l'état de fonctionnement, mais également en fonction de facteurs environnementaux tels que les besoins en chauffage, les heures de pointe, les températures basses, etc.

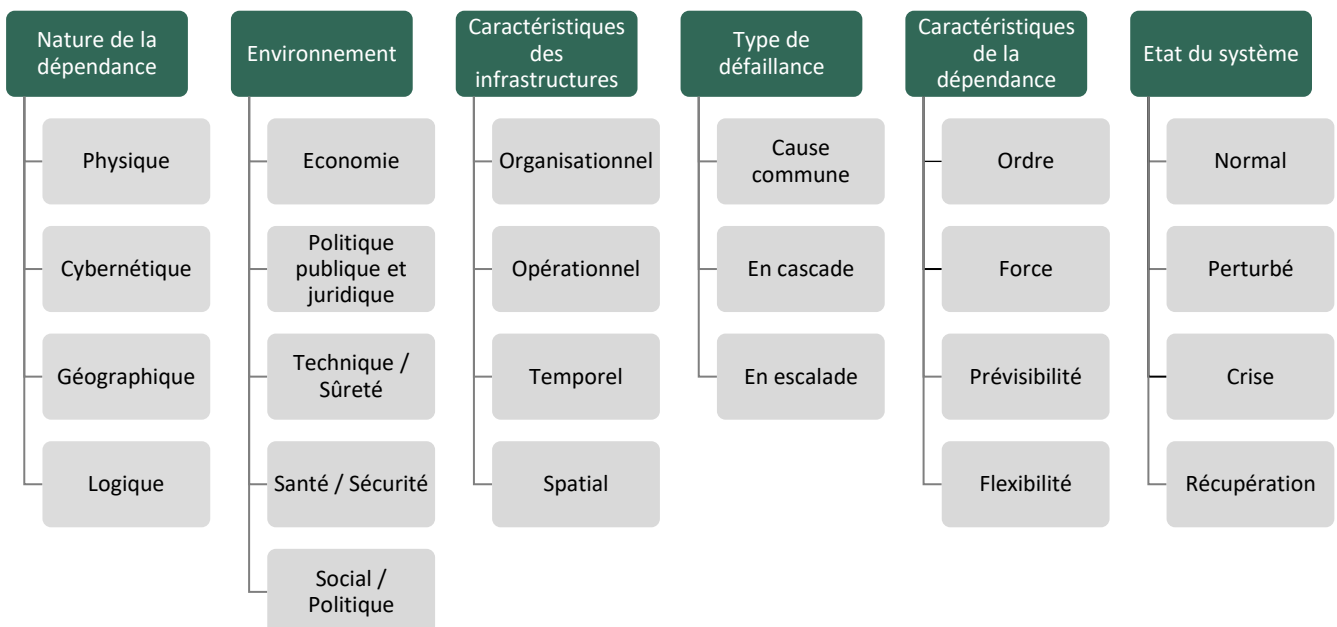


Figure 14 : Les différentes dimensions du processus d'analyse des phénomènes de dépendances entre infrastructures et réseaux. Source : adapté à partir de (Luijff et al., 2008; Perrow, 2011; Rinaldi et al., 2001; Rozel, 2009).

Les (inter)dépendances, en tant que phénomènes complexes, constituent finalement un multiplicateur de risque car elles peuvent devenir une menace et affecter les performances d'une ou plusieurs infrastructures ou systèmes (Frederic Petit & Verner, 2016). Les dysfonctionnements et les défaillances, c'est-à-dire les modifications apportées à la capacité d'un système de s'acquitter de ses fonctions, peuvent alors s'étendre bien au-delà des zones et des systèmes directement affectés par l'événement initiateur. Cela nous conduit à introduire la notion de défaillance en cascade, qui sera explicitée et étudiée de façon détaillée dans le chapitre 2.

#### 1.2.4. Une synthèse des caractéristiques principales des réseaux techniques urbains étudiés

Le Tableau 5 présenté à la page suivante se veut être une synthèse des caractéristiques des réseaux techniques urbains discutées tout au long du chapitre. Ce tableau a été voulu synthétique et concis pour permettre d'avoir une sélection d'informations pertinentes concernant ces réseaux sous un format aisément consultable. On retrouve donc les dix réseaux techniques urbains identifiés, ainsi que les sous-réseaux et leurs fonctions respectives.

Les infrastructures principales et génériques de chacun sont également listées pour comprendre la structure du réseau, qu'elles soient ponctuelles ou linéaires. La configuration et topologie de chaque réseau est ensuite caractérisée par les termes définis précédemment. Les liens génériques de dépendances entrantes (c'est-à-dire les relations dont sont dépendants ces réseaux) sont finalement listés, en précisant leur type.

Tableau 5 : Synthèse des caractéristiques principales des réseaux techniques urbains étudiés

| Catégorie          | Réseau               | Sous-réseaux                                      | Fonctions  | Infrastructures génériques principales   | Configuration   | Dépendances entrantes génériques (inter-réseaux)   |
|--------------------|----------------------|---|--|--|---|--|
| Energie            | Electricité          | Production<br>Transport<br>Distribution           | Produire, transporter et distribuer de l'électricité aux usagers   | Centrales<br>Postes sources<br>Câbles HT, MT et BT<br>Pylônes<br>Transformateurs<br>Postes de distribution                       | Arborescente et maillée<br>Aérienne ou enterrée               | Télécommunications ((télé)gestion) P&C*<br>Voirie (accès) G<br>(Eau (refroidissement)) P<br>Transports en commun (personnel) P   |
|                    | Gaz                  | Production<br>Transport<br>Distribution           | Importer, acheminer et distribuer du gaz naturel aux usagers   | Terminaux<br>Canalisations<br>Compresseurs<br>Postes de coupures, sectionnement et détente<br>Réservoirs<br>Postes de livraisons | Arborescente<br>Enterrée                                      | Télécommunications ((télé)gestion) P&C<br>Electricité (alimentation) P<br>Voirie (canalisations, accès) P&G<br>Transports en commun (personnel) P  |
|                    | Hydrocarbures        | Production<br>Transport                           | Importer, transformer et acheminer des hydrocarbures aux centres de stockage et de distribution          | Raffineries<br>Stations relais<br>Pipelines<br>Dépôts  | Etoilée<br>Aérienne ou enterrée                               | Voirie (livraison et accès) P&G<br>Electricité (alimentation) P<br>Télécommunications (gestion) C  |
|                    | Fluides calorifiques | Production<br>Transport<br>Distribution           | Produire, transporter, distribuer de la vapeur chaude ou de l'eau froide aux usagers                     | Usines de production<br>Canalisations<br>Postes de sectionnement<br>Sous-stations et échangeurs                                  | Arborescente et bouclée<br>Enterrée                           | Eau (fluide) P<br>Electricité (alimentation) P<br>Déchets et carburants (combustibles) P<br>Voirie (canalisations, accès) P&G<br>Transports en commun (personnel) P                                      |
| Eau                | Eau potable          | Captage<br>Traitement et stockage<br>Distribution | Extraire, traiter et acheminer de l'eau potable aux usagers  | Forages et puits<br>Usines de production<br>Postes de relèvement<br>Canalisations<br>Réservoirs<br>Pompes de refoulement         | Arborescente<br>Enterrée                                      | Electricité (alimentation) P<br>Télécommunications ((télé)gestion) P&C<br>Voirie (canalisations, accès) P&G<br>Transports en commun (personnel) P  |
|                    | Assainissement       | Collecte<br>Transport<br>Traitement<br>Rejet      | Assurer l'évacuation des eaux pluviales et usées, leur traitement et leur rejet dans les exutoires       | Avaloirs<br>Postes de relèvements<br>Canalisations<br>Déversoirs<br>Stations d'épuration   | Arborescente inversée<br>Enterrée                             | Electricité (alimentation) P<br>Télécommunications ((télé)gestion) P&C<br>Voirie (bouches et accès) P&G<br>Métro (rejets) P&G<br>Transports en commun (personnel) P                                      |
| Transport          | Voirie               | Bus<br>Véhicules particuliers                     | Gérer l'ensemble des voies de circulation terrestres permettant le transport de véhicules routiers       | Chaussées<br>Caniveaux, regards, avaloirs<br>Éclairage<br>Signalisation<br>Ponts et tunnels                                      | Arborescente et maillée<br>Aérienne (et enterrée)             | Hydrocarbures P<br>Electricité (signalisation et éclairage) P<br>Assainissement (débordements) P&G   |
|                    | Transport ferré      | Métro<br>Train / RER<br>Tram                      | Transporter les usagers et biens d'une gare à l'autre dans des véhicules circulant sur des voies ferrées | Voies ferrées<br>Gares et stations<br>Ponts et tunnels<br>Pylônes et caténaires<br>Postes d'aiguillage                           | Maillée<br>Aérienne et enterrée                               | Electricité (alimentation) P<br>Voirie (accès) P&G<br>Télécommunications ((télé)gestion) P&C<br>Assainissement (rejets) P&G  |
| Télécommunications |                      | Fixe<br>Mobile<br>Internet                        | Assurer les communications au moyen de réseaux filaires, en suivre, en fibre optique ou ondes radio      | Centres de transit<br>Nœuds de raccordement abonnés<br>Points de concentration<br>Sous-répartiteurs<br>Câbles<br>Pylônes         | Arborescente et maillée, hiérarchisée<br>Aérienne et enterrée | Electricité (alimentation) P<br>(Eau (refroidissement)) P<br>Voirie (accès) P<br>Transports en commun (personnel) P  |
| Déchets            |                      | Collecte<br>Transport<br>Traitement               | Collecter, transporter, traiter et valoriser les déchets urbains, industriels et commerciaux             | Conteneurs<br>Camions<br>Dépôts et centres de transfert<br>Centres de tri<br>Centres de valorisation                             | Etoilée inversée<br>Aérienne (en enterrée)                    | Carburants (collecte) P<br>Voirie (accès) P&G<br>Electricité (alimentation centres) P<br>Télécommunications ((télé)gestion) P&C<br>Eau (nettoyage et traitement) P<br>Transports en commun (personnel) P |

\*Légende : P = dépendance physique, L = logique, G = géographique, C = cybernétique

### 1.3. CONCLUSION

Dans ce premier chapitre, nous avons pu explorer les objets physiques au sein desquels les phénomènes de défaillances en cascade peuvent apparaître, à savoir les réseaux techniques urbains. Ces réseaux urbains sont des systèmes de systèmes complexes et indispensables au fonctionnement de la ville, que nous pouvons considérer comme des infrastructures critiques pour une échelle urbaine et non nationale. Cependant, les infrastructures critiques n'apparaissent pas comme les objets les plus pertinents dans le cadre de ces recherches, et nous nous focaliserons sur les réseaux techniques et leurs infrastructures. Ceux-ci peuvent être catégorisés selon la nature des éléments dont ils permettent le déplacement : informations pour les télécommunications, biens et personnes pour les transports, fluides pour les réseaux d'énergie et d'eau, matières pour les réseaux de déchets.

Ces réseaux se révèlent très divers, que ce soit dans leur fonctionnement, leur composition mais aussi leur organisation topologique. Les infrastructures qui les composent peuvent être linéaires ou nodales, et de différentes catégories. Ils occupent une place majeure pour les villes, que ce soit en temps normal, lors d'une crise ou pendant la phase de retour à la normale. Il nous semble que ces réseaux techniques et leurs infrastructures peuvent être considérés comme des infrastructures critiques car ils en présentent les caractéristiques et la criticité, à condition que l'on se place à l'échelle urbaine et non nationale.

Ces réseaux complexes se révèlent également divers au niveau de leur vulnérabilité aux différents aléas auxquels ils peuvent être exposés, qu'ils soient naturels ou anthropiques. Nous considérons de plus que leurs dépendances à d'autres systèmes constituent une des composantes de leur vulnérabilité. Ces dépendances (ou interdépendances si elles sont réciproques) peuvent exister à plusieurs niveaux de granularité : entre infrastructures ou entre réseaux, au sein d'un même réseau ou de plusieurs. Ce sont des phénomènes dynamiques et complexes, qui peuvent être de différentes natures : physique, géographique, cybernétique et logique ou sociale. Ils sont à l'origine des défaillances en cascade, phénomènes au cœur de notre sujet que nous introduisons dans le chapitre suivant.

Ce chapitre souligne ainsi l'importance des réseaux urbains mais surtout leur complexité et leur diversité, qui influencera grandement les choix de modélisation étudiés dans cette thèse. La problématique des (inter)dépendances est également soulevée, et ce chapitre montre à quel point celles-ci sont complexes, dynamiques, et multi-scalaires.

## CHAPITRE 2 : LES DEFAILLANCES EN CASCADE : DEFINITION ET CARACTERISATION DE PHENOMENES COMPLEXES

Ce chapitre a pour objectif principal d'introduire et d'expliciter les phénomènes de défaillances en cascade, conséquences des (inter)dépendances discutées dans le chapitre précédent. Il vise à la description, la caractérisation et la définition de ces phénomènes complexes. Il permet également de discuter des différentes échelles et dimensions associées, qui auront une importance dans les choix de modélisation qui seront discutés par la suite.

Ce chapitre permet de comprendre les tenants et aboutissants des défaillances en cascade au sein des réseaux techniques urbains, et d'introduire leur complexité. La première partie du chapitre permet de recenser les définitions existantes aujourd'hui concernant ces phénomènes et de discuter de la variété de celles-ci. Ce foisonnement est d'ailleurs un indice de la complexité de cette notion. Grâce à l'analyse de ces différentes définitions, nous proposons une définition qui nous semble pertinente et qui sera utilisée pour le reste de nos travaux. La deuxième partie s'intéresse quant à elle aux caractéristiques plus concrètes de ces phénomènes. Elle propose de discuter des facteurs favorisant leur apparition, des enjeux concernés, et des dimensions et échelles à considérer.

### 2.1. LES DEFAILLANCES EN CASCADE

Nous introduisons tout d'abord le phénomène de défaillance en cascade de façon conceptuelle et schématique, en introduisant ses différentes composantes : différents systèmes dépendants les uns des autres, un événement principal représentant une menace, une séquence d'événements arborescents qui peuvent représenter à leur tour des menaces pour d'autres systèmes, un phénomène de propagation des défaillances. Les différentes définitions de ce phénomène existantes aujourd'hui à travers le monde sont ensuite présentées et comparées, afin d'en proposer une qui nous semble appropriée à notre contexte de recherche, à savoir les (inter)dépendances et défaillances en cascade au sein des réseaux techniques urbains. Cette définition et ses composantes seront la base de notre analyse des retours d'expérience du chapitre 3. Nous proposons ensuite une délimitation claire entre les différents phénomènes de chaînes de défaillances identifiables, pour ne pas confondre les défaillances en cascade, les défaillances de cause commune et les défaillances en escalade.

#### 2.1.1. Une première approche conceptuelle

Le chapitre 1 nous a permis d'introduire le concept plus ou moins abstrait des (inter)dépendances entre les réseaux techniques urbains et entre leurs infrastructures. Celles-ci peuvent entraîner la propagation des dysfonctionnements d'un système à d'autres systèmes qui lui sont dépendants. Il arrive alors que les dysfonctionnements et les défaillances – c'est-à-dire les altérations de l'aptitude d'un système à accomplir ses fonctions – soient propagés sur des zones bien plus grandes que celles directement touchées par l'aléa initiateur.

Lorsqu'un système ou une infrastructure subit une panne ou une défaillance, il est souvent possible d'estimer les conséquences directes de cette défaillance sur la prestation du service. Toutefois, celle-ci peut également réduire la capacité d'autres infrastructures à fournir le niveau de service qu'elles fournissent normalement, en conséquence des (inter)dépendances existantes. Et les impacts de cette



défaillance peuvent ne pas s'arrêter à ces effets de premier ordre. Ces effets de premier ordre peuvent en effet avoir à leur tour des effets négatifs sur d'autres composants, infrastructures, ou groupes d'infrastructures, y compris même l'infrastructure à l'origine du problème, ce qui aggravera encore la situation. Ces effets deviennent des effets de second ordre, qui peuvent se propager encore plus loin, provoquant encore une série d'effets de troisième ordre et ainsi de suite. La façon dont ces effets se propagent et la gravité de ces effets dépendent notamment des caractéristiques des dépendances entrant en jeu, présentées au chapitre 1, mais aussi des mesures prises pour empêcher cette propagation. C'est pourquoi la perte d'un composant essentiel peut provoquer des défaillances beaucoup plus graves et étendues que la défaillance d'origine.

Nous pouvons citer comme exemple un enchaînement impressionnant de défaillances entraîné par l'ouragan Sandy survenu aux Etats-Unis en 2012. L'inondation de postes électriques a entraîné la coupure de l'électricité sur des zones très étendues, ce qui a entre autres eu pour conséquence l'arrêt des raffineries de pétrole et par effet domino l'approvisionnement de stations essence qui n'étaient pas touchées par les impacts de premier ordre - c'est-à-dire provoqués directement par l'aléa (Haraguchi & Kim, 2014). Et ce alors même que l'approvisionnement de ces stations devenait un enjeu primordial pour faire face aux problèmes de mobilité, engendrés par le dysfonctionnement du métro new-yorkais, mais aussi aux nouveaux besoins en matière d'hydrocarbures, nécessaires pour faire fonctionner des groupes électrogènes. Pour illustrer notre propos, nous considérons dans la Figure 15 trois systèmes S1, S2 et S3 représentés sur la figure ci-dessous, où S2 est dépendant de S1 pour fonctionner, et S3 est dépendant de S2. Si une perturbation touche S1, et provoque son dysfonctionnement, celui-ci peut être propagé à S2 par le biais de la dépendance qui les relie. En effet, le lien fonctionnel n'est plus assuré et entraîne le dysfonctionnement de S2. L'enchaînement peut alors se répéter et se propager de S2 à S3.

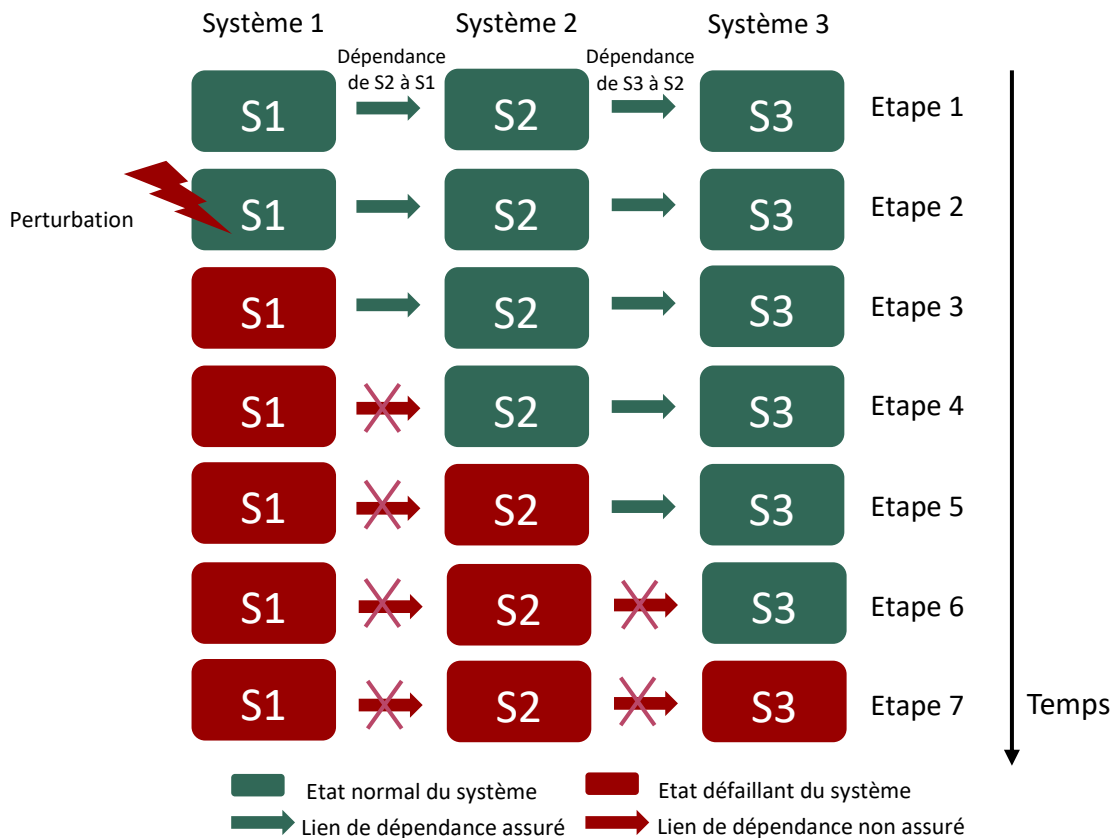


Figure 15: L'évolution logique et temporelle des états de 3 systèmes génériques S1, S2 et S3, traduisant la propagation de la défaillance d'un système à un autre par le biais de dépendances, à la suite d'une perturbation.

Des enchaînements plus complexes et moins linéaires peuvent également survenir, comme illustré dans les trois figures ci-dessous (Figure 16, Figure 17, Figure 18). Nous pouvons ainsi imaginer deux événements distincts mais concomitants E1 et E2 (perturbations, aléas ou autres), qui vont entraîner par le biais de processus d'endommagements des impacts sur différents systèmes. Nous pouvons identifier des dégâts DEiSi entre les événements Ei et le système Si, qui entraînent des impacts ISi. Ces impacts peuvent alors entraîner à leur tour des impacts sur d'autres systèmes Sj par le biais de liens de dépendances DSiSj (cf. Figure 16). Un système peut être touché par plusieurs événements, et il peut être dépendant de plusieurs systèmes (cf. Figure 18). Des boucles de rétroaction peuvent également survenir (cf. Figure 17).

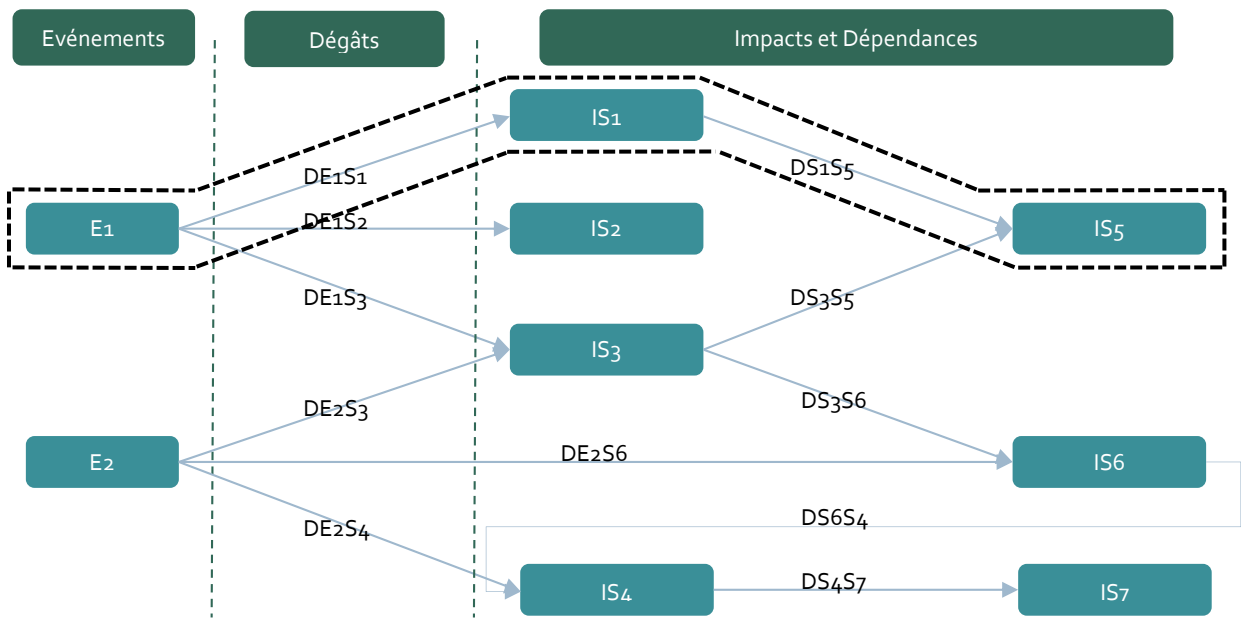


Figure 16 : La propagation linéaire des impacts des dégâts occasionnés par l'événement E1 sur le système S1, puis sur le système S5 dépendant du système S1.

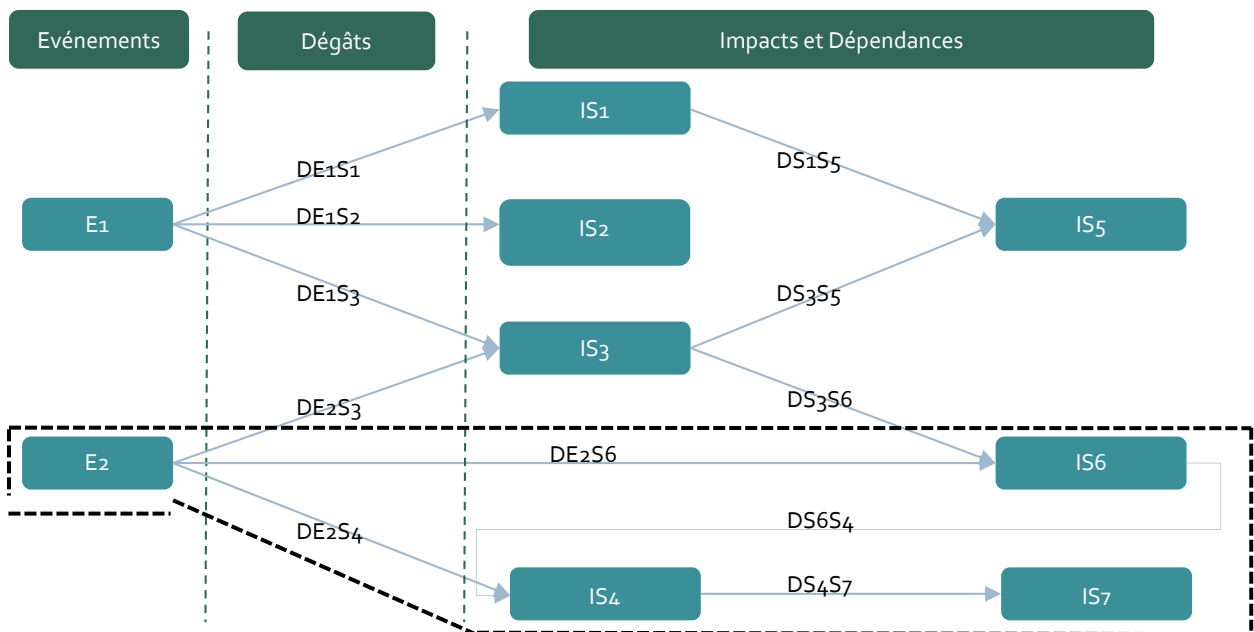


Figure 17 : La propagation non linéaire des impacts occasionnés par les dégâts de l'événement E2 sur le système S6, puis sur le système S4 dépendant du système S6, en parallèle des dégâts occasionnés par l'événement E2 sur le système S4.

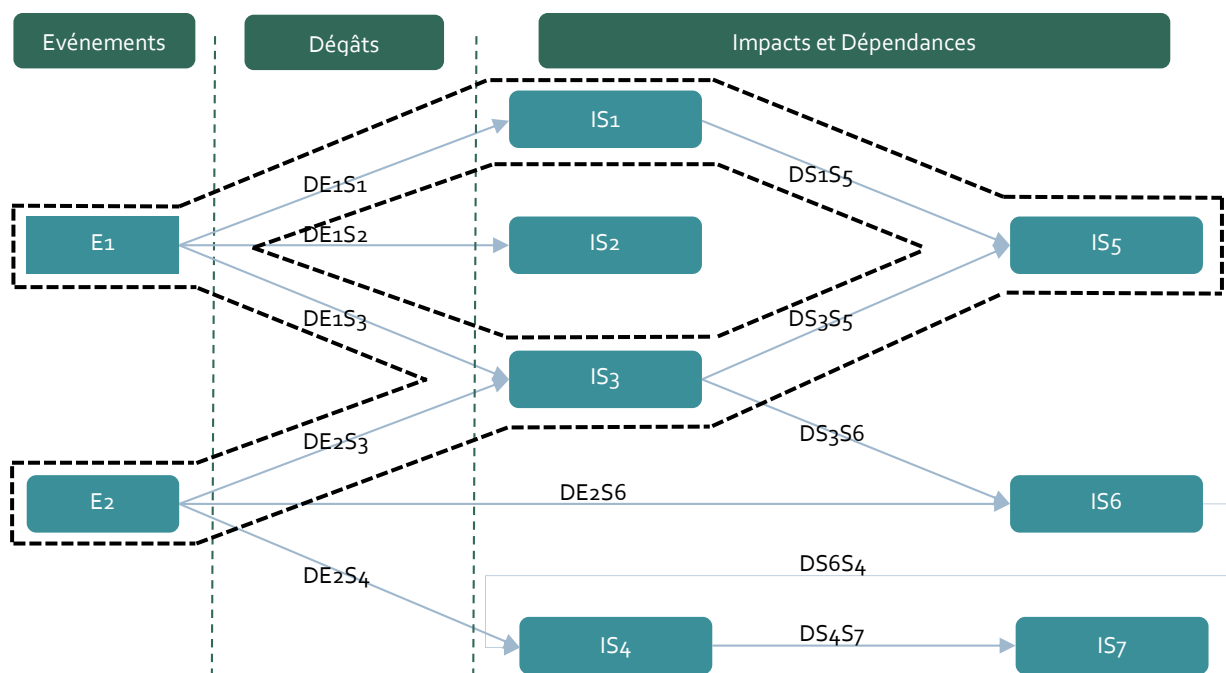


Figure 18 : La propagation arborescente des impacts occasionnés par les dégâts combinés des événements E1 et E2 sur les systèmes S1 et S3, qui entraîne des impacts sur le système S5 dépendant à la fois de S1 et de S3.

Le phénomène de défaillances en cascade a ainsi pour origine un événement principal représentant une menace, qui est suivi d'une séquence d'événements arborescents dits secondaires, tertiaires ou d'ordre supérieur, qui peuvent représenter à leur tour des menaces pour d'autres systèmes. C'est ici que l'analogie des dominos intervient : le premier domino est renversé, il entre en collision avec le suivant de la ligne, qui bascule à son tour et les bascules s'enchaînent jusqu'à la fin de la séquence de façon linéaire ou arborescente.

Les défaillances en cascade sont des phénomènes complexes, multidimensionnels et qui évoluent dans le temps. En cas d'enchaînement de défaillances, chaque défaillance particulière peut devenir le point de départ d'une ou plusieurs nouvelles séquences de défaillances. De même nous pouvons observer des boucles de rétroaction, où une défaillance d'un système S2 engendrée par une dépendance à un système S1 peut rétroagir sur le système S1 par le biais d'une relation d'interdépendance. Ces phénomènes sont d'ailleurs plus associés à l'ampleur de la vulnérabilité et des impacts engendrés qu'à l'ampleur des aléas (Pescaroli & Alexander, 2015).

### 2.1.2. De nombreuses définitions pour un phénomène encore flou

Malgré cette acceptation du concept général présenté ci-dessus, la définition du phénomène reste vague et manque d'explications précises (May, 2007). Ces phénomènes font l'objet de nombreuses définitions (Necci et al., 2015), qui se révèlent parfois incohérentes entre les différents travaux (McGee et al., 2014). Nous rencontrons notamment les termes d'effets en cascade (Zimmerman & Restrepo, 2009), de défaillances en cascade (Buzna et al., 2007), de catastrophes en cascade (Haavisto et al., 2013), d'effets domino (Benoît Robert et al., 2013), de propagation en cascade (Helbing, 2013), de défaillance d'infrastructures en cascade (Rose, 2009). Nous avons donc choisi de présenter un panorama des définitions rencontrées, avec la terminologie correspondante dans le Tableau 6 ci-dessous :

Tableau 6 : Panorama des terminologies et définitions des effets en cascade

| Source                   | Terminologie              | Définition  |
|--------------------------|---------------------------|---|
| (CCPS, 1999)             | Accident domino           | La propagation d'un scénario accidentel primaire provoquant un ou plusieurs événements secondaires, entraînant une escalade de la gravité des conséquences.   |
| (Rinaldi et al., 2001)   | Effets cascade            | La défaillance d'une infrastructure qui cause la défaillance d'un élément d'une seconde infrastructure, provoquant ainsi sa défaillance.  |
| (Little, 2002)           | Effets d'interdépendances | Les effets d'interdépendance se produisent lorsqu'une perturbation d'une infrastructure se propage au-delà d'elle-même, ce qui entraîne des impacts non négligeables au sein d'autres infrastructures, provoquant à leurs tours davantage d'effets sur d'autres infrastructures.  |
| (United Nations, 2005)   | Effets domino             | Un incident qui peut sembler a priori très local peut déclencher une réaction en chaîne affectant le monde entier, par le biais des multiples interrelations qui existent au niveau des diverses sphères (sociale, économique, technique, environnementale) de nos sociétés.  |
| (Cozzani et al., 2006)   | Effets domino             | On peut caractériser les effets domino par quatre caractéristiques principales : un scénario accidentel primaire, qui déclenche l'effet domino ; un effet de propagation à la suite de l'événement primaire ; un ou plusieurs scénarios accidentels secondaires, entraînant la propagation de l'événement primaire ; une escalade des conséquences de l'événement primaire dû à l'effet des scénarios secondaires.  |
| (Ash & Newth, 2007)      | Défaillances en cascade   | Les défaillances en cascade au sein d'un réseau sont initiés lorsqu'un nœud fortement chargé est perdu pour une raison quelconque, et la charge sur ce nœud (c'est-à-dire le flux qui le traverse) doit être redistribuée vers les autres nœuds du réseau. Cette redistribution peut amener d'autres nœuds à dépasser leur capacité, entraînant également leur échec. Les mécanismes de protection intégrés au réseau peuvent également provoquer des arrêts. Par conséquent, le nombre de nœuds défaillants ou stressés augmente, se propageant à travers le réseau. |
| (May, 2007)              | Phénomène en cascade      | Phénomène associé principalement à des événements où une menace primaire est suivie par une séquence d'aléas « secondaires ».   |
| (Antonioni et al., 2009) | Escalade                  | La propagation d'un événement accidentel primaire à des unités proches, entraînant leur endommagement et d'autres événements accidentels secondaires résultant en un scénario global plus grave que l'événement primaire ayant déclenché l'escalade.  |
| (Kadri et al., 2011)     | Effets domino             | Ils consistent en une séquence d'événements interdépendants susceptibles de produire en chaîne des dommages importants voire d'ordre catastrophique dans une installation industrielle et son environnement. Il s'agit plus précisément d'un ou plusieurs événements dits primaires qui se propagent et provoquent des événements secondaires dont les conséquences se superposent voire amplifient celles du ou des événements primaires.  |
| (Robert et al., 2012)    | Effets domino             | La défaillance d'une infrastructure peut entraîner des perturbations et des défaillances d'autres infrastructures via des interdépendances, se propageant dans le temps et l'espace.  |

| Source                        | Terminologie                                    | Définition  |
|-------------------------------|---|---|
| (Reniers & Cozzani, 2013)     | Accident domino, effet domino                   | Un accident dans lequel un événement indésirable primaire se propage au sein d'un équipement (dans le temps) et/ou dans un équipement à proximité (dans l'espace), de manière successive ou simultanée, déclenchant un ou plusieurs événements secondaires indésirables pouvant à leur tour déclencher d'autres événements indésirables (d'ordre supérieur), entraînant des conséquences globales plus graves que celles de l'événement initial primaire. |
| (Ekman & Lange, 2014)         | Effets cascade                                  | Les éléments d'un événement déclencheur donné dans le cas où les dépendances du système conduisent à la propagation des impacts à d'autres systèmes ; les impacts combinés des événements propagés ont de plus grandes conséquences que les premiers impacts ; de multiples parties prenantes et/ou intervenants sont impliqués.  |
| (Pescaroli & Alexander, 2015) | Effets cascade                                  | Dynamiques présentes lors de catastrophes où l'impact d'un événement physique ou le développement d'une défaillance initiale (technologique ou humaine) génère une séquence d'événements dans des sous-systèmes humains, qui entraînent des perturbations physiques, sociales ou économiques.   |
| (McDaniels et al., 2007)      | Défaillances d'infrastructures interdépendantes | Défaillances au niveau de systèmes d'infrastructures interdépendantes qui sont dues à la défaillance initiale d'une infrastructure causée par un événement extrême. Un système d'infrastructures défaille ainsi à la suite d'interdépendances avec un autre système d'infrastructures, qui a déjà défailli.   |

Il nous faut préciser que ces terminologies et définitions étant traduites de l'anglais, des subtilités de signification peuvent ne pas être conservées lors du passage en français. Nous remarquons d'ailleurs que le mot défaillance n'est que rarement utilisé en tant que tel dans l'appellation du phénomène. L'analyse des définitions et terminologies présentées ci-dessus nous amène à proposer plusieurs éléments partagés :

- La présence d'un événement initial qui déclenche le processus est commune aux définitions, celui-ci étant parfois qualifié d'extrême.
- Le côté imprévu et accidentel est également partagé par plusieurs définitions.
- Le processus de propagation à d'autres systèmes et infrastructures est toujours présent. Cette propagation peut se faire entre différents systèmes, dans l'espace et dans le temps, même si certaines définitions ne tiennent compte que de la propagation liée à la proximité géographique.
- La notion de séquence d'événements est sous-entendue ou formalisée dans la plupart des définitions, avec l'identification d'événements d'ordre supérieur.
- L'effet d'aggravation progressif est également partagé par plusieurs de ces définitions.
- Certaines définitions identifient formellement le rôle des (inter)dépendances dans les phénomènes de propagation, alors que d'autres ne le font pas.
- Seule la définition d'Ekman et Lange (2014) introduit la notion de multiplicités des acteurs et parties prenantes.

Nous prenons le parti pour la suite de ces travaux de considérer les défaillances en cascade comme le phénomène de propagation des défaillances d'un système, engendrées par un événement initial, à d'autres systèmes. Cette propagation physique, cybernétique, logique ou géographique se fait par le biais de dépendances entre les systèmes et entraîne l'apparition d'événements d'ordre supérieur et l'aggravation progressive des impacts de l'événement initial.

### 2.1.3. Les défaillances de cause commune et en escalade

Il faut bien différencier les différents types de chaînes de défaillance : les défaillances de cause commune, les défaillances en escalade, les défaillances en cascade (Rinaldi et al., 2001).

- Les défaillances de cause commune ou mode commun : deux systèmes défont simultanément suite à une cause commune (dépendance à un même système qui a défont par exemple). Ce type de chaîne de défaillances est souvent confondu avec les liens de dépendances géographiques, où deux systèmes sont liés de façon physique et non fonctionnelle par le biais de leur proximité géographique.

Considérons un exemple où un incendie se propage au niveau d'une infrastructure. La propagation des flammes à une autre infrastructure est une défaillance de cause commune et non une dépendance géographique car l'infrastructure est vulnérable au feu, et non à la défaillance de la première infrastructure.

- Les défaillances en aggravation / en escalade : Un système défont et la perturbation indépendante d'un autre système exacerbe la perturbation de ce système en augmentant la sévérité ou le délai de remise en service. Ces phénomènes concernent une conjonction de plusieurs effets cascade sur une infrastructure, aggravant sa défaillance et son temps de remise en service.

Si l'on prend l'exemple d'une rupture d'un câble électrique dans une usine, qui nécessiterait un remplacement, la perturbation du réseau routier ou de simples embouteillages peuvent allonger le temps de la perturbation de la distribution d'électricité dans l'usine en ralentissant les équipes de techniciens chargés de remplacer le câble, alors que ce même câble n'est pas dépendant du réseau routier pour fonctionner.

- Les défaillances en cascade : Les défaillances d'un système, engendrées par un événement initial, sont propagées à d'autres systèmes. Cette propagation physique, logique ou géographique se fait par le biais de dépendances entre les systèmes et entraîne l'apparition d'événements d'ordre supérieur et l'aggravation progressive des impacts de l'événement initial.

Il convient également de différencier les défaillances en cascade internes et externes. Les cascades internes se font au sein d'un même système de systèmes, alors que les cascades externes se propagent dans des systèmes complètement différents. Cependant, la limite des systèmes de systèmes peut être floue et variable selon la granularité de l'étude.

## 2.2. UNE PREMIERE CARACTERISATION

### 2.2.1. Les évolutions actuelles propices à leur apparition

Certaines évolutions de la société font de la problématique des réseaux techniques urbains (inter)dépendants un sujet toujours plus actuel. En effet, nous devenons de plus en plus dépendants de ces réseaux, exigeant d'eux qu'ils soient toujours disponibles et fonctionnels, et les réseaux deviennent eux-mêmes de plus en plus dépendants les uns des autres et de plus en plus vulnérables.

L'augmentation des risques liés aux réseaux techniques ou infrastructures critiques a déjà été soulevée, et des facteurs structurels à l'origine de ce phénomène ont été proposés (Setola et al., 2017). Nous présentons et complétons ici ceux qui nous paraissent les plus pertinents dans notre contexte de recherche :

- La diminution du contrôle de l'Etat et la multiplication des acteurs dues à la libéralisation et à la privatisation de ce type de réseau, qui introduit également le principe de concurrence.
- L'utilisation accrue des technologies de l'information et des télécommunications pour la gestion, le monitoring et le contrôle des réseaux techniques.
- L'urbanisation (étalée ou dense) qui met à rude épreuve des infrastructures parfois vieillissantes dont le dimensionnement n'est plus adapté, et qui augmente le rassemblement géographique de différentes infrastructures (exemple des conduites regroupant les câbles de télécommunications, électricité, gaz, etc.).
- L'augmentation des interconnexions et des chaînages entre les parties prenantes et les systèmes.
- La recherche constante de l'efficacité et de la rentabilité, qui entraîne notamment la diminution des stocks, les processus en flux tendu, la télégestion, la sous-traitance...

D'ailleurs, la directive présidentielle étasunienne de 1998 (White House, 1998) considérait déjà que « suite aux progrès des technologies informatiques et la nécessité d'améliorer leur efficacité, ces infrastructures sont devenues de plus en plus automatisées et interconnectées. Ces mêmes progrès ont créé de nouvelles vulnérabilités relatives aux pannes d'équipement, aux erreurs humaines, aux conditions météorologiques et à d'autres causes naturelles, et attaques physiques et cyber-attaques ». Helbing estimait que les interdépendances croissantes entre nos systèmes d'énergie, d'alimentation en nourriture et en eau, nos systèmes de production mondialisés, les systèmes financiers et de communication, mais aussi les écosystèmes et le climat étaient également à l'origine de nouvelles vulnérabilités (Helbing, 2013).

Ces réseaux critiques deviennent donc très complexes, entrelacés, hyper connectés, surchargés, parfois vétustes, et dépendent toujours plus de moyens informatisés plus ou moins fragiles. Ils sont également gérés par des acteurs très divers (publics, privés, communaux, étatiques...), porteurs d'objectifs parfois contradictoires.

Du côté des menaces, nous assistons également à une augmentation des aléas naturels, notamment suite aux changements climatiques actuels, à la raréfaction de certaines ressources, mais aussi à la multiplication d'actes malveillants. Ces phénomènes augmentent alors logiquement les risques relatifs aux réseaux urbains et leurs impacts.

### 2.2.2. Des conséquences potentiellement majeures

De par l'organisation et le fonctionnement même des systèmes en réseaux, leurs composants sont essentiellement interconnectés et interagissent les uns avec les autres via ce réseau. Les réseaux interdépendants sont ainsi extrêmement sensibles aux défaillances, et une suppression aléatoire d'une petite proportion de nœuds d'un réseau donné peut entraîner une cascade de défaillances itératives dans plusieurs réseaux interdépendants (Buldyrev et al., 2010).

Les défaillances en cascade peuvent alors entraîner des conséquences majeures et étendues, que ce soit au niveau spatial, au niveau temporel, mais aussi au niveau du nombre d'éléments touchés. Ils peuvent également entraîner l'aggravation des conséquences initiales (des premières défaillances entraînées par l'événement initiateur). L'analyse de quelques retours d'expériences dans le chapitre 3 permettra d'observer les différentes manifestations de cet effet de propagation et d'aggravation.

La non prise en compte des phénomènes d'influences mutuelles entraîne la sous-estimation de la probabilité d'occurrence de défaillances en cascade. C'est pourquoi il est important d'identifier toutes les dépendances possibles, y compris celles qui ne sont pas évidentes ou visibles. (Eusgeld et al., 2011). L'identification et l'étude des (inter)dépendances est donc la première étape de l'étude des défaillances en cascade – ou effets domino – ou effets cascade – et de l'identification de contre-mesures dans un contexte opérationnel. (McGee et al., 2014). De plus, une séquence d'événements précise est difficile à prévoir car il existe pratiquement un nombre infini de modes de fonctionnement et d'évolutions possibles qui devraient être pris en compte.

Ces phénomènes de cascade ont tendance à mettre en évidence des vulnérabilités non identifiées ou non résolues de la société, et augmentent les conséquences d'un aléa lors de sa survenue. Mais ils rendent aussi les processus de récupération et de reconstruction beaucoup plus lents et plus difficiles (Lhomme, 2012), ce qui soulève des problèmes systémiques et liés à la résilience.

Finalement, les (inter)dépendances et les défaillances en cascade qui en découlent se révèlent être des « multiplicateurs » de risque (Petit & Verner, 2016). En effet, elles étendent les vulnérabilités des infrastructures critiques et des réseaux desquels elles font partie, elles génèrent des conséquences en cascade telles que les défaillances en cascade, et elles élargissent les exigences nécessaires à la résilience des systèmes.

Ayant été notamment mises en avant par la déclaration de Sendai de 2015 (UNISDR, 2015), les défaillances en cascade font depuis quelques années l'objet de nombreuses recherches et ce principalement dans le cadre de travaux portant sur la protection des infrastructures critiques, comme il en sera discuté dans le chapitre 4. Ce sujet tient ainsi une place importante dans la société actuelle depuis une quinzaine d'années, que ce soit au niveau des préoccupations politiques et économiques, mais aussi normatives et réglementaires.

Nous assistons ainsi à une multiplication des projets de recherche, de définitions et de cadres méthodologiques d'étude de ces phénomènes, notamment à la suite de la survenue de plusieurs événements lors desquels des chaînes de défaillances majeures ont été observées. On pense par exemple à l'ouragan Sandy qui a frappé la côte atlantique des États-Unis en 2012, illustré dans le chapitre 3. Cette multiplicité et cette diversité seront à l'origine de nos interrogations de la partie II, concernant les méthodologies pour l'étude et la modélisation de ces phénomènes.

### 2.2.3. Dimensions et échelles à considérer pour leur analyse

Nous avons montré que les réseaux techniques urbains étaient des systèmes complexes, et cela implique entre autres une imbrication des échelles, qui est un enjeu central de la problématique. Ces systèmes complexes sont également au carrefour de nombreuses dimensions d'analyse, que nous présentons ci-dessous.

Si nous reprenons les différentes théories de la complexité centralisées par Dauphiné (2003) et illustrées par la Figure 19, nous pouvons affirmer que les réseaux techniques urbains sont complexes de par leur nombre d'infrastructures et composants, de par l'imbrication des niveaux d'organisation,



mais aussi de par l'imbrication des échelles géographique, technique et temporelle. Le comportement chaotique et difficilement prévisible est également une de leur caractéristique, comme souligné par l'apparition de phénomènes de cascade.

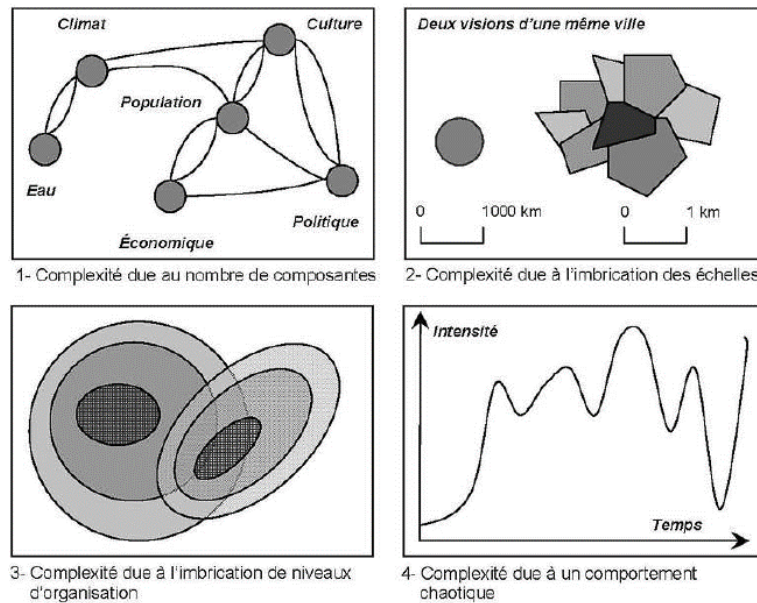


Figure 19 : Les théories de la complexité chez les géographes. Source : (Dauphiné, 2003).

Les services urbains, sous le spectre de la problématique des (inter)dépendances et des défaillances en cascade, se trouvent au carrefour de plusieurs disciplines et approches comme notamment la géographie, la sociologie, l'ingénierie mais aussi le génie urbain qui a évolué ces dernières années en intégrant la complexité du système urbain dans son approche (Toubin, 2014; Diab & Landau, 2017). Leur analyse fait ainsi appel – entre autres - au territoire dans lequel ils s'inscrivent, aux acteurs impliqués, aux caractéristiques techniques du territoire et des réseaux eux-mêmes...

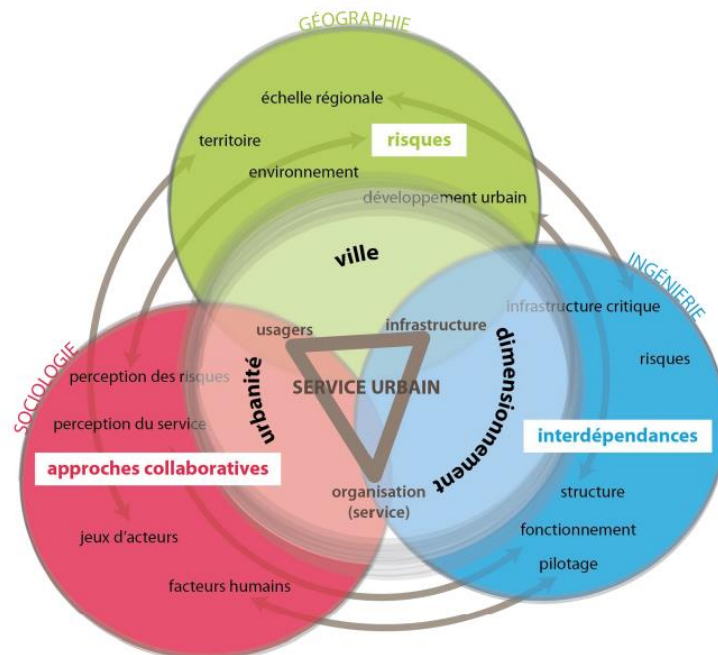


Figure 20 : Les services urbains à l'interface des approches territoriales, techniques et socio-organisationnelles.

Source : (Toubin, 2014).

Leur étude doit également faire appel à de nombreuses dimensions d'analyse pour permettre une version holistique de la problématique. Nous pouvons ainsi identifier la question des échelles temporelles et spatiales de l'analyse, mais aussi d'autres problématiques plus spécifiques aux systèmes étudiés.

Ainsi, les comportements non-linéaires (ou les effets de cascade) sont à prendre en compte, mais aussi les aspects sociaux, économiques et organisationnels car les réseaux techniques urbains sont des systèmes sociotechniques complexes au cœur d'enjeux de gouvernance, de marchés, de décisions humaines, de procédures etc. (Lhomme, 2012; Rinaldi, 2004).

Dans le cadre des travaux présentés ici, nous prenons le parti de considérer que la problématique des défaillances en cascade au sein des réseaux urbains comporte différentes dimensions, et que chacune de ces dimensions comporte plusieurs « échelles » correspondant en quelque sorte à des niveaux d'analyse de ces phénomènes :

- Tout d'abord, il est indispensable de tenir compte de la dimension spatiale, qui va déterminer les périmètres physiques géographiques de la zone considérée.  
Les « échelles » spatiales peuvent aller d'un continent à un îlot urbain, en passant par une région, une agglomération, un quartier, etc. Cette dimension est déterminante pour l'étude de ces phénomènes, comme nous le verrons plus loin.
- La prise en compte de la dimension structurelle est nécessaire, car elle correspond notamment aux différentes « échelles » que nous pouvons identifier dans l'étude des réseaux urbains. Selon que nous placions à une échelle très large comprenant de multiples réseaux en interaction, ou bien à une échelle plus réduite comprenant un seul réseau, voire si l'on descend au niveau de certaines infrastructures ou même composants d'infrastructures, les techniques de modélisation et la granularité des informations seront très différentes. Le nombre et le type des réseaux étudiés entreront également de façon importante dans le choix des méthodes, ainsi que leur mode de gestion ou même la présence de capteurs pour le monitoring.
- Une dimension organisationnelle entre par ailleurs en jeu, avec les différentes « échelles » de gouvernance et d'action correspondant notamment aux missions, champs d'action et cercles d'influence des parties prenantes telles que la préfecture de police, les services déconcentrés de l'Etat, les collectivités locales, les établissements publics, les gestionnaires, les experts, les secours, les clients, les populations...
- Finalement, il est important de considérer la dimension temporelle et ses différentes « échelles » correspondant notamment à la période de pré-crise (planification), à la période de crise (gestion de crise) et à la période de post-crise (remise en service).  
Les paramètres à étudier et les techniques de modélisation seront très différents selon la dimension temporelle choisie, ainsi que les pas de temps pouvant alors varier de minutes au mois.

Toutes ces dimensions (comprenant les différentes « échelles ») entretiennent des relations très complexes entre elles, car elles sont nécessairement liées très étroitement. Par exemple, un opérateur privé d'un certain service sera responsable sur un certain périmètre de la gestion d'un certain morceau de réseau et des infrastructures qui le composent. Il répondra à diverses missions – la distribution d'un service en temps normal par exemple - selon ses contraintes et ses objectifs, et interagira avec d'autres acteurs. Son champs d'action tiendra donc à la fois compte des dimensions spatiale, organisationnelle, structurelle et temporelle. Et cette configuration sera évidemment propre seulement à cet acteur.

Par ailleurs, en plus des liens intrinsèques entre ces différentes dimensions, il existe de nombreuses relations et contraintes entre celles-ci, que nous avons tenté de représenter de façon simplifiée avec la Figure 21 ci-dessous.

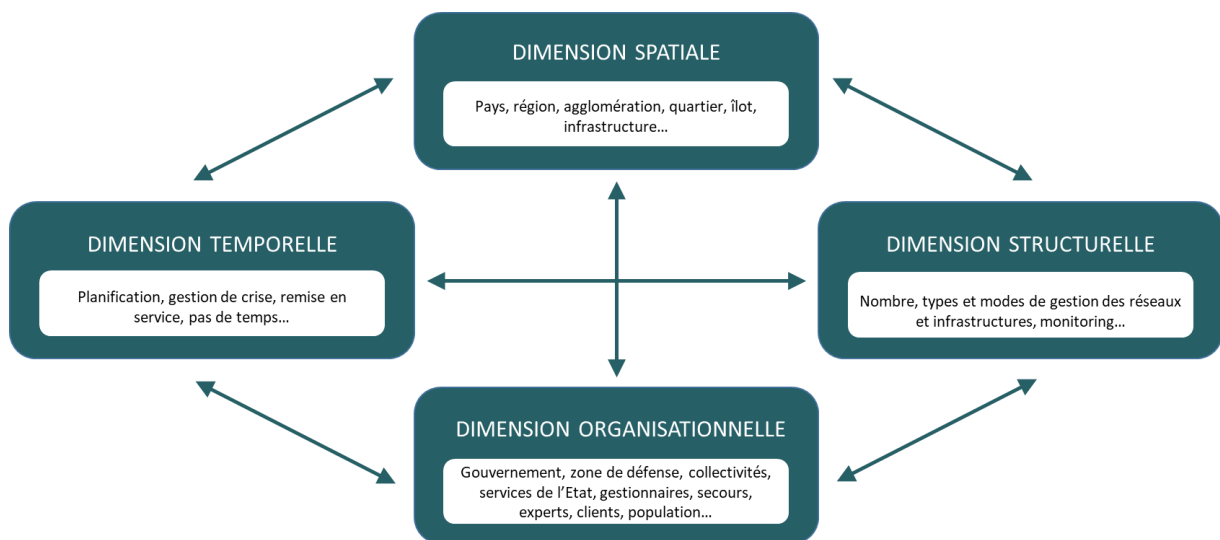


Figure 21 : L'analyse des phénomènes d'(inter)dépendances et défaillances en cascade au sein des réseaux techniques urbains : des dimensions et « échelles » interdépendantes à considérer.

Une observation importante qui découle de l'étude des différentes expérimentations et des différents travaux sur le sujet des défaillances en cascade est l'importance majeure de l'échelle spatiale choisie lors de la sélection de la zone d'étude. Le problème des échelles est un sujet primordial dans l'étude des interactions entre réseaux urbains, infrastructures, acteurs, territoires... En effet, celles-ci vont avoir une influence sur la nature et le nombre des éléments à étudier, la façon dont il faudra les étudier, les personnes à impliquer, le temps que le processus prendra etc.

La question de l'emboîtement des échelles spatiales pour l'analyse des (inter)dépendances entre les infrastructures est une question centrale et critique de notre problématique. Les travaux de Toubin (2014) sur la résilience des réseaux parisiens et la collaboration entre les opérateurs de service ont déjà discuté de la nécessité de prendre en compte l'emboîtement des diverses échelles spatiales, allant de l'échelle du territoire à celle du composant (cf. Figure 22).

L'objectif est alors d'allier les visions territoriale et locale, les visions fonctionnelle et technique, mais aussi les visions macroscopique, mésoscopique et microscopique pour avoir une conception du territoire la plus hollistique possible.

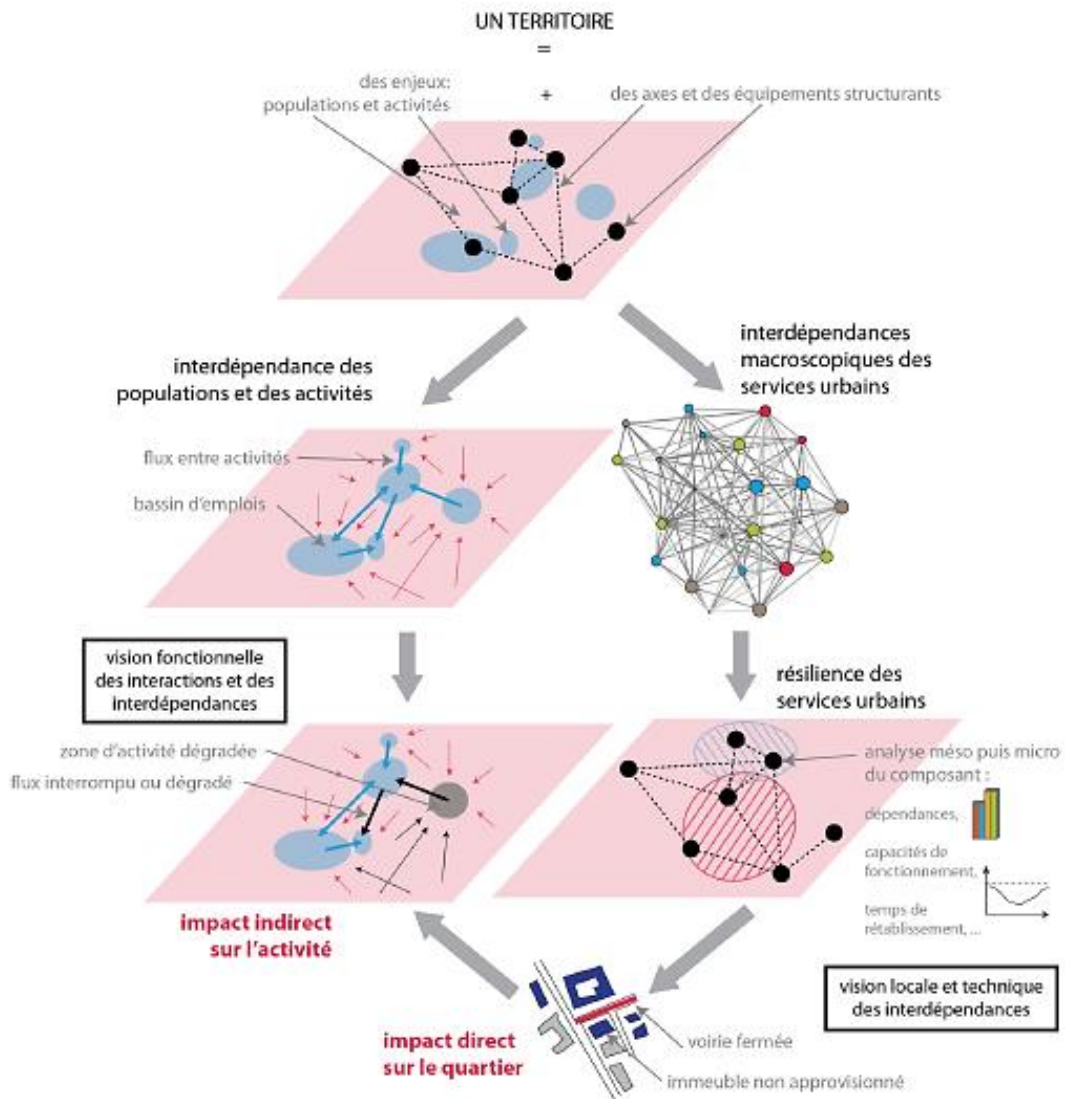


Figure 22 : La prise en compte de l’emboîtement des échelles spatiales pour l’analyse de la résilience. Source : (Toubin, 2014)

Mais nous pouvons aller plus loin et discuter de l’intérêt de l’emboîtement des échelles nationales jusqu’aux échelles locales en passant par les échelles territoriales. En effet, les réseaux techniques actuels sont souvent gérés à l’échelle régionale, nationale voir internationale (comme le souligne l’exemple des réseaux de transport d’électricité) et l’étude des (inter)dépendances au niveau « super-macro » peut également se révéler pertinente.

Ces analyses nous amènent à introduire le concept de granularité concernant l’analyse des relations entre ces « systèmes de systèmes » complexes. En effet, chaque service ou réseau est composé de différentes infrastructures interconnectées qui elles-mêmes sont composées de composants interconnectés. Et des éléments d’un niveau peuvent être également connectés à des éléments des niveaux inférieurs ou supérieurs. Se pose donc la question du choix de la granularité à laquelle le processus d’analyse se fait, dans l’optique d’être précis et vraisemblable tout en restant faisable.

Ces aspects seront discutés de façon plus approfondie dans le chapitre 6 de ce manuscrit, mais il est intéressant de les introduire ici pour aider à la compréhension du chapitre 3, consacré aux retours d’expériences de défaillances en cascade à travers le monde. Ces retours empiriques permettent en effet de souligner l’aspect multi-scalaire et multi-granulaire de ces phénomènes.

La Figure 23 propose une illustration simplifiée de l'« effet de zoom », et de la difficulté de ne considérer qu'un périmètre arrêté de façon indépendante du territoire. Différents périmètres de zones d'étude y sont représentés, avec les infrastructures d'un réseau théorique correspondant à cette granularité. Plus la zone d'étude se restreint, plus la granularité peut augmenter et plus le nombre d'infrastructures pertinentes à l'analyse peut augmenter (ce phénomène est représenté par l'éclaircissement de la couleur des éléments représentés selon les niveaux). Il faut alors considérer les liens avec l'extérieur de la zone d'étude pour conserver une vision d'ensemble pertinente.

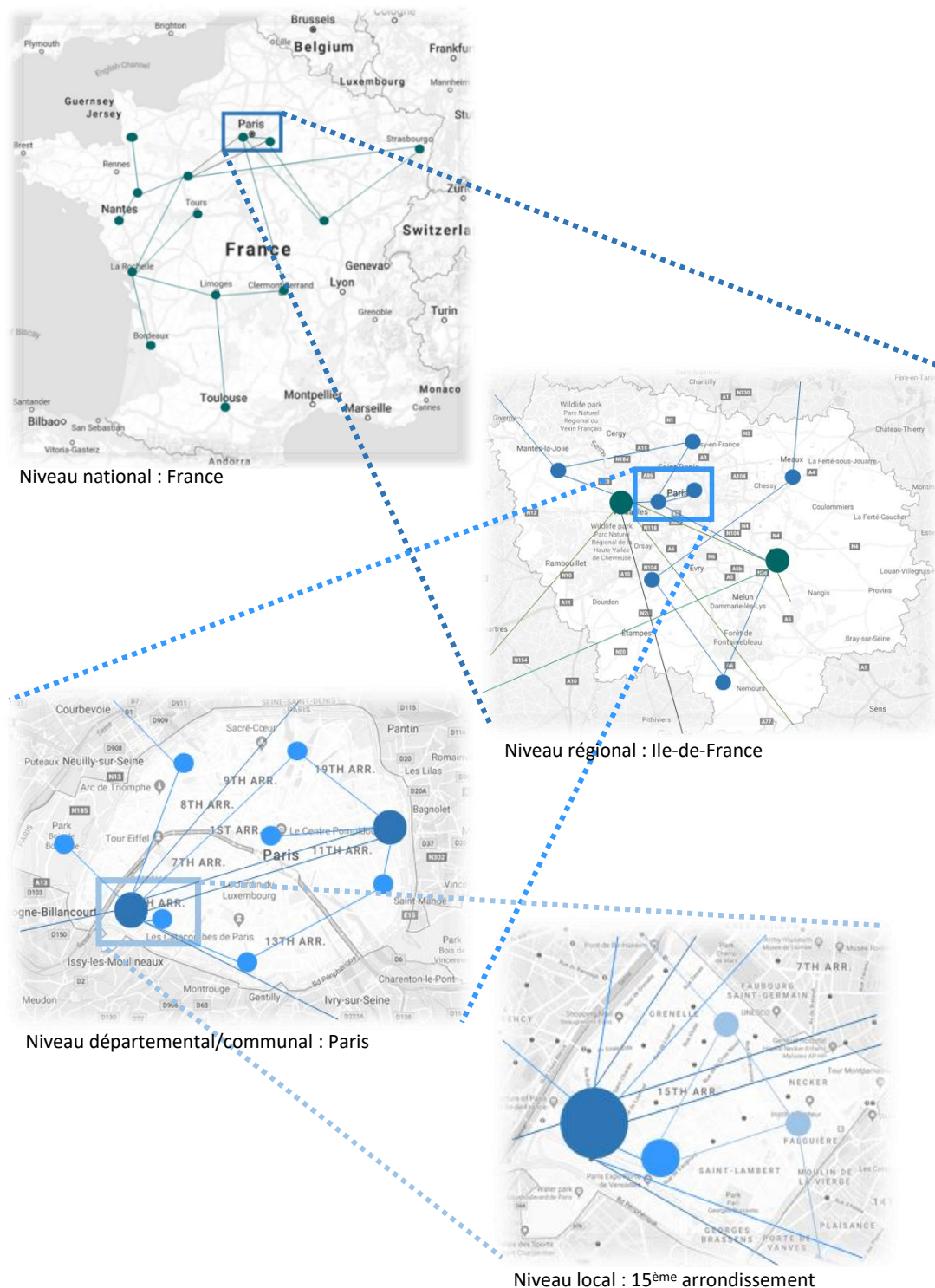


Figure 23 : Illustration de l'« effet de zoom » lorsqu'on limite la zone géographique prise en compte, en partant de l'échelle nationale pour arriver à l'échelle locale.

Une autre représentation schématique des différents niveaux de granularité envisageables lors de l'étude des réseaux techniques urbains est proposée dans la Figure 24 ci-dessous. On peut y observer les différents niveaux de décompositions du système urbain : les différents services et réseaux urbains (le réseau, le réseau d'électricité...), les infrastructures qui les composent (l'usine de traitement des eaux, le poste de transformation...), mais aussi les composants en leur sein (les pompes, les tuyaux, les câbles électriques...). Ces différents systèmes de systèmes peuvent entretenir des relations parmi un même niveau d'analyse mais aussi entre différents niveaux d'analyse. L'enjeu est alors la sélection des éléments à prendre en compte, afin d'obtenir un compromis pertinent entre les limites de l'analyse et la précision de celle-ci.

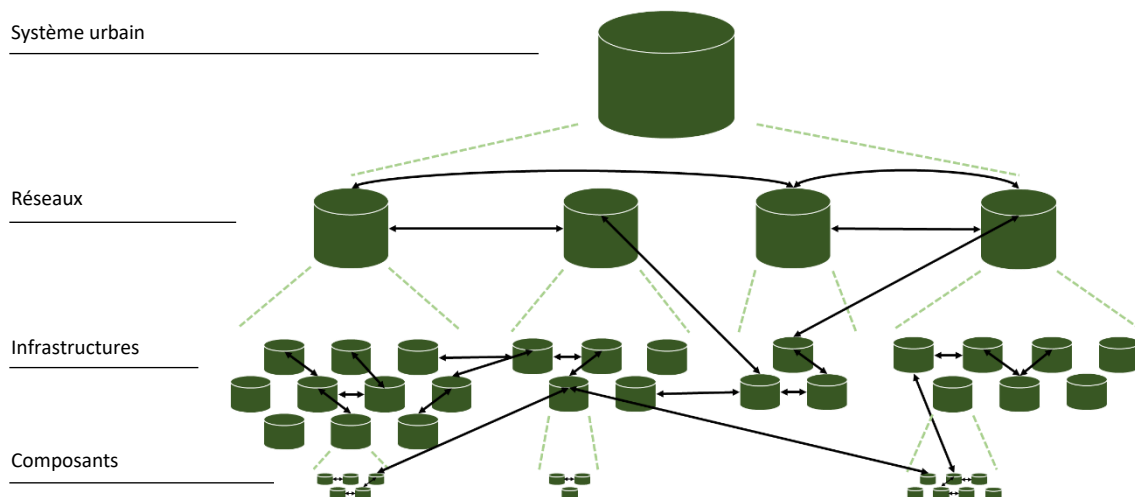


Figure 24 : Les différents niveaux de décomposition du système urbain composé des réseaux techniques urbains.

### 2.3. CONCLUSION

A travers ce chapitre, nous avons pu introduire, définir et caractériser les phénomènes complexes que sont les défaillances en cascade, à différencier des défaillances en escalade et de cause commune. Ce sont des phénomènes aux contours parfois encore flous et aux définitions diverses. Nous avons donc proposé une définition cohérente dans le cadre de nos travaux : nous considérons ainsi les défaillances en cascade comme le phénomène de propagation des défaillances d'un système, engendrées par un événement initial, à d'autres systèmes. Cette propagation physique, cybernétique, logique ou géographique se fait par le biais de dépendances entre les systèmes et entraîne l'apparition d'événements d'ordre supérieur et l'aggravation progressive des impacts de l'événement initial.

Ces phénomènes sont complexes car multi-scalaires, multi-granulaires, multi-sectoriels, et multi-dimensionnels. Ils peuvent impliquer des systèmes de systèmes complexes, nombreux et variés, ce qui les rend difficiles à prévoir et à modéliser comme nous le verrons par la suite.

Une première caractérisation de ces phénomènes nous a par ailleurs amené à souligner les différents facteurs et évolutions actuelles propices à leur apparition, mais aussi leurs potentielles conséquences et impacts. Les différentes dimensions (spatiale, organisationnelle, technique et temporelle) ainsi que les différentes échelles nécessaires à leur analyse sont également introduites et discutées.

# CHAPITRE 3 : ILLUSTRATION PAR L'ANALYSE DE QUELQUES RETOURS D'EXPERIENCE

Ce chapitre 3 a pour objectif principal d'illustrer les propos assez conceptuels des chapitres 1 et 2 par des analyses de retours d'expérience. Il a tout d'abord pour ambition de dresser le portrait des études empiriques dans la littérature et de leurs enseignements. Il est également l'occasion de discuter de l'intérêt et des difficultés de l'étude a posteriori de ces phénomènes.

Afin de compléter ces analyses statistiques, nous proposons ensuite une grille d'analyse construite à partir des différentes composantes de la définition proposée dans le chapitre 2. Cette grille d'analyse est alors appliquée à cinq retours d'expérience représentatifs de la diversité des situations. Les conclusions des analyses effectuées sont ensuite présentées de façon organisée, en détaillant les différentes conclusions permises par les analyses, selon les caractéristiques identifiées précédemment.

## 1.1. L'ETUDE EMPIRIQUE DES DEFAILLANCES EN CASCADE

### 1.1.1. Les objectifs, la méthodologie et les difficultés rencontrées dans le cadre de l'analyse empirique

L'analyse des événements et des scénarios de défaillances en cascade qui sont survenus à travers le monde est essentielle pour tenter de mieux les comprendre et mieux les appréhender. En effet, les incidents passés sont quasiment la seule source d'informations réelles disponibles, car le reste vient généralement de modélisations, de simulations ou de l'expertise. L'organisation d'expériences représentatives dans des infrastructures réelles se révèle par ailleurs inenvisageable, et la construction et la maintenance d'infrastructures dédiées à des expérimentations représenterait un coût faramineux.

L'examen des scénarios de défaillances en cascade donne alors la possibilité d'analyser les événements initiateurs, les chaînes d'événements, les dynamiques de propagation, les systèmes concernés, la temporalité de l'incident... Ce travail peut alors permettre de découvrir des liens de dépendances encore inconnus ou non détectés, des points communs ou de divergence entre les différents événements selon leurs caractéristiques, d'identifier des systèmes plus susceptibles d'être à l'origine ou de propager des défaillances en cascade.

L'étude empirique des défaillances en cascade se base principalement sur l'analyse des rapports de retours d'expérience réalisés à la suite des événements ou catastrophes survenues à travers le monde. Ces documents permettent de conserver la trace de la gestion des situations vécues, d'acquérir de nouvelles compétences et connaissances, et de les utiliser pour améliorer l'anticipation des futurs événements. Cet apprentissage peut alors être introduit dans les outils, dans les méthodes et dans les structures organisationnelles concernées (Wybo, 2009; Wybo & Wassenhove, 2009).

Ce travail se heurte cependant à plusieurs difficultés, liées au manque d'informations détaillées sur le sujet spécifique des défaillances en cascade dans les documents disponibles.

- Premièrement, la survenue de ce type de phénomène n'est pas très courante, notamment ceux comportant des séquences d'événements complexes et étendus.
- Deuxièmement, les analyses faites a posteriori de ces événements ou catastrophes font généralement peu de place à la problématique des réseaux et des infrastructures critiques, et encore moins aux dépendances en tant que telles. De plus, le reporting méthodique des événements n'est souvent pas à l'ordre du jour lors de ce type de phénomène majeur, et la réticence des organisations à mettre en valeur leurs défaillances, erreurs et manquements rend la récolte d'informations ardue. Ces travaux se focalisent en général sur les impacts sur les populations ou les activités touchées.
- Troisièmement, il n'existe actuellement pas de trame méthodologique partagée pour la construction d'un retour d'expérience, à part dans certains contextes comme l'armée, ce qui rend difficile leur étude comparée.

### 1.1.2. Éléments empiriques recueillis dans la littérature

Tout d'abord le recensement des défaillances en cascade ayant été enregistrées montre que ces phénomènes ne sont pas rares (Van Eeten et al., 2011), contrairement à ce qu'il est parfois admis. Les scénarios de cascades montrent, en général, une gravité supérieure à celle des scénarios classiques. L'analyse empirique des défaillances enregistrées au niveau d'infrastructures critiques montre que les événements peuvent être classés en trois catégories : événement initiant une cascade, événement résultant d'une cascade, et événement indépendant (Luijff et al., 2010).

Une étude conséquente des événements de défaillances en cascade observés à travers le monde a pu évaluer la représentativité des différents secteurs (services, réseaux, activités...) parmi les événements initiateurs de cascade ou des événements résultant de cascade. Certains réseaux semblent plus « agressifs » que d'autres, c'est-à-dire qu'ils impactent, par leur perturbation, de façon plus importante les autres réseaux. De plus, différentes études empiriques menées (Daniel, 2017; Luijff et al., 2010) nous amènent à avancer que peu de secteurs sont finalement à l'origine de séquences de défaillances graves et multisectorielles.

Dans la Figure 25 sont présentées des statistiques résultant du recensement et de la caractérisation de plus de 800 événements de défaillances en cascade à travers le monde (Luijff et al., 2010). Les résultats démontrent la surreprésentation des secteurs de l'énergie et des télécommunications en tant qu'initiateurs des cascades.

|                      | Cascade initiating<br>% | Cascade resulting<br>% | Independent<br>% | Total<br>%   | Sample size<br>N |
|----------------------|-------------------------|------------------------|------------------|--------------|------------------|
| Education & research | 0                       | 100                    | 0                | 100          | 1                |
| Energy               | 28                      | 6                      | 64               | 101          | 192              |
| Financial services   | 3                       | 28                     | 70               | 100          | 39               |
| Food                 | 0                       | 60                     | 40               | 100          | 5                |
| Government           | 2                       | 44                     | 54               | 100          | 43               |
| Health               | 5                       | 42                     | 53               | 100          | 19               |
| Industry             | 20                      | 60                     | 20               | 100          | 10               |
| Internet             | 13                      | 49                     | 39               | 101          | 107              |
| Telecommunications   | 25                      | 34                     | 43               | 102          | 167              |
| Transport            | 3                       | 23                     | 75               | 101          | 190              |
| Water                | 7                       | 18                     | 77               | 102          | 57               |
| <b>Total</b>         | <b>14.8</b>             | <b>26.6</b>            | <b>59.4</b>      | <b>100.8</b> | <b>830</b>       |

Figure 25 : Défaillances en cascade au sein de différents secteurs (pourcentage par rapport au total des événements).  
Source : (Luijff et al., 2010)



Il semble d'ailleurs que les télécommunications constituent très souvent un élément central des scénarios et sont particulièrement importants pour atténuer les impacts et les perturbations (Conrad et al., 2006). Le réseau de distribution d'électricité est un des réseaux les plus « agressifs », dans le sens qu'un grand nombre de systèmes sont physiquement dépendants d'une alimentation en électricité pour pouvoir fonctionner. De façon logique, nous observons que ces réseaux critiques font l'objet de nombreuses études, et incarnent le support privilégié d'un grand nombre de modélisations comme l'électricité par exemple (Yusta et al., 2011).

La Figure 26 reprend quant à elle les résultats des travaux de (Luijff et al., 2010) selon la répartition des secteurs initiateurs ou affectés par des cascades. On retrouve les places déterminantes des secteurs de l'énergie et des télécommunications, qui sont initiateurs de cascade dans la grande majorité des autres secteurs. Les autres secteurs regroupant des réseaux techniques urbains, tels que les secteurs de l'eau et du transport, se révèlent ici moins « agressifs ».

| Affected sector      | Initiating sector |                    |            |            |            |            |             |            |            | TOTAL      |
|----------------------|-------------------|--------------------|------------|------------|------------|------------|-------------|------------|------------|------------|
|                      | Energy            | Financial Services | Government | Health     | Industry   | Internet   | Telecom     | Transport  | Water      |            |
|                      | %                 | %                  | %          | %          | %          | %          | %           | %          | %          | %          |
| Education & research |                   |                    |            |            |            |            |             |            | 100        | 100        |
| Energy               | 100               |                    |            |            |            |            | 0           |            |            | 100        |
| Financial services   | 27                | 9                  |            |            |            | 9          | 55          |            |            | 100        |
| Food                 | 67                |                    |            |            | 33         |            |             |            |            | 100        |
| Government           | 26                |                    | 5          | 5          |            | 11         | 47          | 5          |            | 100        |
| Health               | 50                |                    |            | 25         |            |            | 13          |            | 13         | 100        |
| Industry             | 83                |                    |            |            |            |            |             |            | 17         | 100        |
| Internet             | 15                |                    |            |            |            | 25         | 60          |            |            | 100        |
| Telecommunications   | 48                |                    |            |            |            |            | 52          |            |            | 100        |
| Transport            | 67                |                    |            |            | 2          |            | 14          | 14         | 2          | 100        |
| Water                | 80                |                    |            |            |            |            |             |            | 20         | 100        |
| <b>TOTAL</b>         | <b>46.6</b>       | <b>0.5</b>         | <b>0.5</b> | <b>1.4</b> | <b>0.9</b> | <b>7.2</b> | <b>37.1</b> | <b>3.2</b> | <b>2.7</b> | <b>100</b> |

Note: figures in italics are referenced in the main text.

Figure 26 : Evènements catégorisés selon les secteurs initiateurs et les secteurs affectés (pourcentage des évènements). Source : (Luijff et al., 2010)

Concernant les méthodologies d'analyse des retours d'expérience, nous pouvons citer, même si elle reste une initiative isolée, la trame d'analyse empirique des défaillances au sein d'infrastructures interdépendantes développée par McDaniels et al. (2007), appliquée aux blackouts électriques sur le continent américain. L'analyse s'est concentrée sur les quatre grandes villes les plus touchées par la panne : New York, Detroit, Cleveland et Toronto. La Figure 27 caractérise les défaillances dans des infrastructures interdépendantes ("infrastructure failure interdependencies" ou IFI) enregistrées dans la base de données pour la panne d'électricité du nord-est américain durant l'été 2003, en termes de défaillances de premier et de second ordre et du degré de perturbation.

Ce formalisme permet notamment de représenter de façon schématique les conséquences du blackout et leur niveau de gravité, selon les services touchés. On souligne cependant que seulement les dépendances d'ordre limité sont alors représentées.

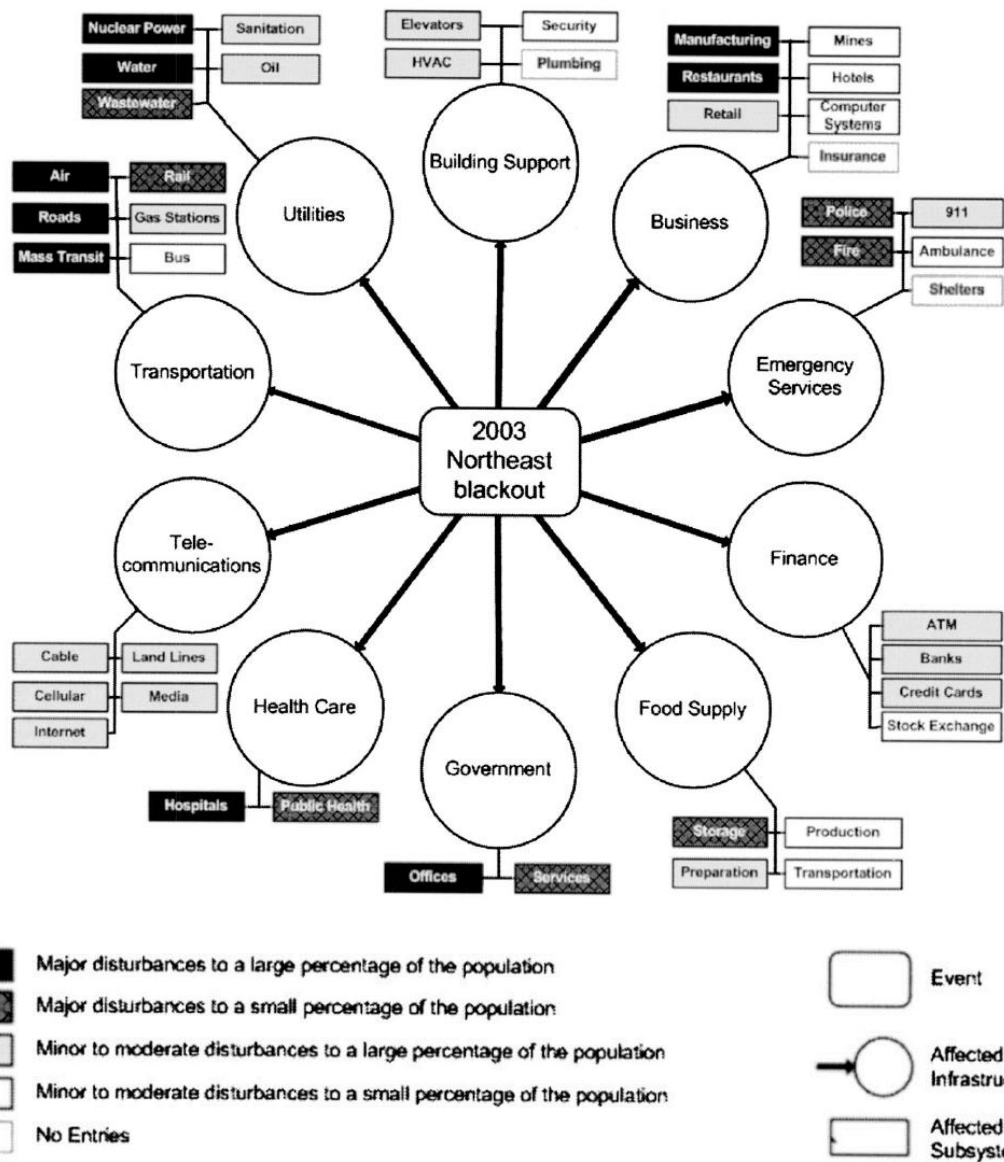


Figure 27 : Défaillances au sein d'infrastructures interdépendantes ("infrastructure failure interdependencies") et leurs conséquences lors du blackout électrique au Canada et dans le Nord-Est des Etats-Unis en 2003. Source : (McDaniels et al., 2007)

## 1.2. CONSTATS ET ENSEIGNEMENTS DE RETOURS D'EXPERIENCE

Nous avons ici souhaité compléter les éléments trouvés dans la littérature par une analyse croisée et commune de différents retours d'expériences ayant touché des réseaux techniques. Ces événements ont été sélectionnés pour leur représentativité de la variété et de la gravité des phénomènes de défaillances en cascade, et ce autour du monde et pour différentes types d'événements initiateurs. L'objectif est d'illustrer la diversité et la complexité de ces phénomènes mais aussi la place centrale des dépendances en leur sein, tout en soulignant le manque de connaissances associées. Une grille d'analyse commune est ainsi appliquée aux différents retours d'expérience, et une représentation des scénarios de défaillances est proposée pour schématiser la suite logique des événements.

### 1.2.1. Méthodologie mise en place

La grille d'analyse croisée des phénomènes sélectionnés pour notre étude est présentée ci-dessous (cf. Tableau 7), et reprend notamment les différentes composantes de notre définition du phénomène de défaillances en cascade :

Tableau 7 : Grille d'analyse utilisée pour les retours d'expériences de défaillances en cascade.

|                          | Description   |
|--------------------------|---|
| Evènement initiateur     | Type d'événement, cause de l'événement, systèmes concernés  |
| Réseaux touchés          | Réseaux touchés par l'événement initiateur, réseaux touchés par les effets cascade de 1 <sup>er</sup> , 2 <sup>ème</sup> , n <sup>ème</sup> ordre |
| Processus de propagation | Type de propagation (géographique, physique, logique, cybernétique...)  |
| Séquence d'événements    | Séquence logique des événements qui ont eu lieu à la suite de l'événement initiateur  |
| Effets d'aggravation     | Description de l'effet d'aggravation des conséquences constaté, si il existe  |

Les événements sélectionnés pour l'étude sont listés ci-dessous. Ils ont été sélectionnés pour leur représentativité de la diversité des différentes caractéristiques étudiées et présentées dans le tableau précédent. Nous précisons que seulement une partie des événements ayant eu lieu sont ici détaillés :

1. Les défaillances ayant touchées le système énergétique après le passage de l'ouragan Sandy à New York (Etats-Unis) en 2012
2. Les défaillances ayant touchées le réseau électrique lors de la crise survenue en Californie (Etats-Unis) en 2000
3. Les défaillances du réseau de télécommunications après la rupture accidentelle d'une canalisation à Rome (Italie) en 2004
4. Les défaillances ayant touchées les réseaux d'eau potable et d'assainissement lors des inondations de Prague (République Tchèque) et ses alentours en 2002
5. Les défaillances multisectorielles ayant touchées la région de Fukushima (Japon) lors du séisme et du tsunami de 2011

Les informations nécessaires à l'analyse de ces événements peuvent être obtenues dans la littérature scientifique, dans des rapports techniques et dans des bases de données spécifiques, mais aussi parfois dans la presse grand-public. Ces différents supports ont été mis à contribution pour le travail qui est présenté à la suite.

## 1.2.2. Portfolio de retours d'expérience

### 1.2.2.1. Sandy en 2012, New York (USA)

De nombreux enchaînements de défaillances ont été entraînés par l'ouragan Sandy survenu aux États-Unis en octobre 2012, ayant notamment touché les côtes du New Jersey et de New York. Cette région est une des plus denses des États-Unis, elle concentre de nombreuses infrastructures et enjeux essentiels au fonctionnement du pays (FEMA, 2013). Nous pouvons citer les chaînes de cascade sur les bâtiments, sur le secteur de l'économie, sur le réseau d'assainissement et sur les réseaux de télécommunications (Kunz et al., 2013). La complexité de la catastrophe et de ses multiples formes transparaît notamment dans le nombre de victimes, l'ouragan ayant causé directement la mort de 72 personnes aux États-Unis, et causé indirectement la mort de 87 autres personnes, dont 50 apparemment liées à l'effet conjoint des coupures de courant prolongées et des températures très basses.

Une des chaînes de défaillances les plus remarquables est celle concernant l'approvisionnement énergétique, car la production, le stockage et la distribution ont été affectés de façon importante (Grangeat, 2017). L'inondation de postes électriques a entraîné la coupure de l'électricité sur des zones très étendues, ce qui a, entre autres, provoqué l'arrêt des raffineries de pétrole et par effet domino l'approvisionnement de stations essence qui n'étaient pas touchées par les premiers impacts (Haraguchi & Kim, 2014b).

Tableau 8 : Analyse d'une chaîne de défaillances lors du passage de l'ouragan Sandy à New York (USA) en 2012.

|                          | Description   |
|--------------------------|---|
| Evènement initiateur     | Vents violents et submersion marine   |
| Réseaux touchés          | Réseau électrique, réseau d'hydrocarbures, réseau de transports en commun, réseau routier   |
| Processus de propagation | Propagation principalement physique et logique  |
| Séquence d'événements    | La tempête et la submersion marine entraînent la submersion d'infrastructures pétrolières, électriques, de transport tandis que les vents violents causent des ruptures de câbles électriques. On assiste alors à des coupures électriques, l'arrêt d'infrastructures pétrolières et l'arrêt de nombreuses lignes de transports en commun.<br>Pour pallier les coupures, des générateurs de secours sont installés, et les habitants se rabattent sur le transport routier. Cependant, les infrastructures pétrolières étant à l'arrêt et les stations-service n'étant plus desservies, ces deux solutions palliatives sont vite rendues impossibles. |
| Effets d'aggravation     | Concomitance de nombreux événements dispersés dans l'espace, touchant les très nombreuses infrastructures du territoire. Aggravation des impacts de la carence en carburant du fait de l'utilisation importante de fuel pour des solutions palliatives.   |

Les impacts ont à la fois fait suite à la submersion marine, mais aussi aux vents violents. Par exemple, de nombreuses infrastructures électriques de transport et de distribution ont été endommagées par des vents violents (ou par la chute d'arbres arrachés par ces mêmes vents) et des incendies ont été générés par des câbles sous tension perturbés par l'onde de tempête (FEMA, 2013; Gibbs & Holloway, 2013; Kunz et al., 2013). Des inondations ont touché des dizaines de sous-stations électriques ainsi que plusieurs postes-sources, dont les réparations ont pu débuter après que les eaux se sont retirées et après que les routes d'accès ont pu être dégagées. Les zones privées d'électricité ont été bien plus étendues que les zones inondées et la remise en service a été parfois lente et laborieuse, notamment du fait d'impacts considérables provoquée par l'eau de mer sur certaines installations électriques. Ces défaillances de l'approvisionnement énergétique ont touché de très nombreuses personnes et se sont manifestées de différentes façons pour les habitants notamment sur les réseaux électriques, les réseaux de gaz, les réseaux de télécommunications et les réseaux de transport. Les processus de récupération ont duré des mois dans les zones les plus touchées du littoral (Comes & Van de Walle, 2014).

Cette séquence d'événements provoquée par plusieurs aléas simultanés illustre un cas où le contexte en termes d'organisation et d'occupation du territoire peut avoir un impact sur certaines caractéristiques en termes de complexité, de gravité et de propagation dans le temps. Ici, c'est notamment la forte concentration d'infrastructures diffuses dans l'espace qui a créé de nombreuses situations d'urgence concomitantes. De plus, nous soulignons l'effet d'aggravation relatif aux solutions palliatives mises en œuvre, qui ont finalement été impactées par les mêmes effets mais de façon indirecte. L'approvisionnement en carburant a en effet été principalement touché par l'arrêt de l'approvisionnement en carburant et non par les coupures électriques ou les inondations directement.

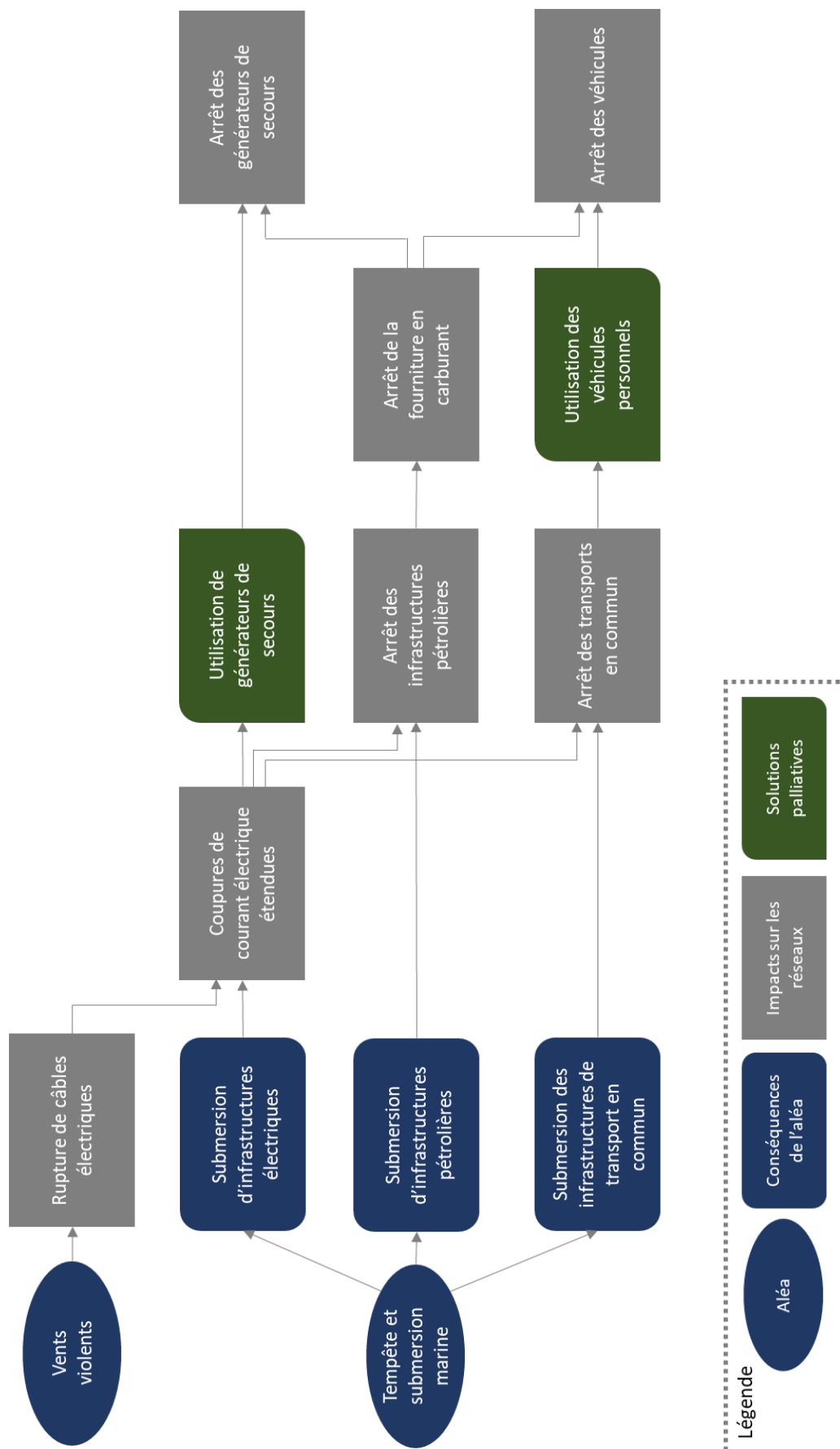


Figure 28: Séquences d'événements d'une chaîne de défaillances lors du passage de l'ouragan Sandy à New York (Etats-Unis) en 2012.

### 1.2.2.2. Black-out électrique en 2000, Californie (USA)

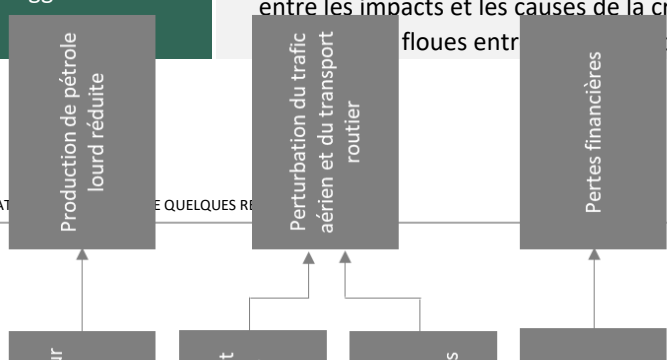
La séquence d'événements multisectorielle, multi-échelle, multi-ordre observée en Californie à la fin de l'année 2000 illustre la complexité de certains de ces phénomènes, et notamment de leurs causes. Elle a tout d'abord été provoquée par la concomitance de nombreux facteurs complexes et interconnectés dont le réseau électrique dépendait de façon physique mais aussi logique : dérèglementation (et manipulation des prix, notamment par l'entreprise ENRON), croissance de la charge, manque d'investissements et infrastructures vieillissantes, augmentation du prix du gaz, sécheresse, etc. Les défaillances du réseau électrique ont alors eu des conséquences en cascade multisectorielles, touchant notamment le secteur du gaz naturel, des hydrocarbures mais aussi de l'agriculture, des transports et de la finance (Rinaldi et al., 2001).

Mais cette séquence a également été aggravée par la dépendance de la production d'électricité à l'approvisionnement en gaz naturel. La production de gaz ayant été réduite par les pertes de puissance électrique, les approvisionnements en gaz des unités de production d'électricité ont diminué et cela a aggravé les défaillances de la production d'électricité par une boucle de rétroaction.

Nous pouvons ici identifier une interdépendance intersectorielle : la production de courant nécessite un approvisionnement en électricité et la production de gaz naturel nécessite un approvisionnement en courant électrique.

Tableau 9 : Analyse d'une chaîne de défaillances lors du blackout électrique en Californie (USA) en 2000.

|                          | Description  |
|--------------------------|--|
| Evènement initiateur     | Crise du marché de l'électricité   |
| Réseaux touchés          | Réseau électrique, réseau d'hydrocarbures, réseaux d'eau, réseau de transport aérien et routier  |
| Processus de propagation | Propagation logique et sociale, physique   |
| Séquence d'événements    | <p>Un déséquilibre entre l'offre et la demande au niveau du réseau de distribution électrique a fait suite à de nombreux facteurs de risques concomitants : dérèglementation (et manipulation des prix), croissance de la charge, manque d'investissements et infrastructures vieillissantes, augmentation du prix du gaz, sécheresse, etc. Ce déséquilibre a entraîné des délestages et des coupures de courant, qui ont de nombreuses conséquences telles que l'arrêt des pompes de pipelines acheminant du carburant, l'arrêt de pompes hydrauliques, la réduction de la production de gaz naturel...La production d'électricité a alors de nouveau été touchée par la rupture de l'approvisionnement en gaz naturel dont elle est dépendante.</p> <p>Des carences en carburant sont apparues à travers la région, et ont notamment perturbé le transport aérien et routier. L'arrêt des pompes hydrauliques et donc de l'arrosage des cultures a par ailleurs entraîné une sécheresse et des pertes importantes.</p> |
| Effets d'aggravation     | <p>Aggravation de la crise par la crise, existence d'une boucle de rétroaction entre les impacts et les causes de la crise, mise en lumière de relations floues entre les enjeux et acteurs.</p>   |

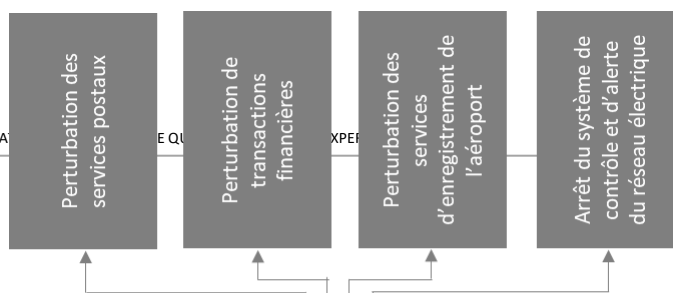


### 1.2.2.3. Nœud de télécommunications en 2004, Rome (Italie)

Cet exemple illustre comment un événement considéré comme mineur de façon isolée peut avoir des conséquences majeures à la suite des dépendances entre les différents systèmes actuels. C'est en effet la rupture d'une canalisation d'eau qui a résultée entre autres en la défaillance des réseaux de télécommunications, la perturbation des réseaux de transports et de certaines institutions bancaires et financières. La rupture d'une canalisation d'eau à destination du système de réfrigération d'un nœud de télécommunications de grande ampleur (le nœud Laurentina) a entraîné la submersion de l'installation et des infrastructures situées en son sein, notamment électriques. Ceci a alors entraîné des court-circuits et la coupure de l'alimentation électrique. Par ailleurs, les générateurs de secours ayant été également touchés par l'eau, ils n'ont pas pris le relais et la coupure du courant n'a pu être évitée après l'arrêt des batteries de secours, ce qui a entraîné l'arrêt du nœud de télécommunications (Thoma, 2011). Les services de télécommunications ont donc connu d'importantes perturbations pendant plus de 6h, pour les services de téléphonie fixe et sans-fil notamment. Les opérateurs ne connaissant pas les impacts potentiels prévisibles ont préféré ne pas avertir les clients et tenter de régler le problème en interne. Nous dénombrons diverses conséquences de ces perturbations : les communications ont été stoppées dans plusieurs milliers de banques et de bureaux de poste, et une grande partie des bureaux d'enregistrement de l'aéroport international ne fonctionnaient plus. Nous soulignons également la défaillance du système de supervision et d'alerte du réseau électrique de Rome suite à la coupure des télécommunications, car les deux canaux de communications entre les deux centres de contrôle ainsi que les télécommandes, alarmes, télémesures étaient inopérants pendant plus d'une heure (Setola et al., 2017; Torres, 2013)

Tableau 10 : Analyse d'une chaîne de défaillances lors du blackout des télécommunications à Rome (Italie) en 2004.

|                          | Description   |
|--------------------------|---|
| Evènement initiateur     | Rupture d'une canalisation d'eau  |
| Réseaux touchés          | Réseau de télécommunications, réseau électrique   |
| Processus de propagation | Propagation géographique, physique et cybernétique  |
| Séquence d'événements    | La rupture d'une canalisation d'eau dans l'enceinte d'un nœud de télécommunications a entraîné la submersion d'infrastructures électriques, dont les générateurs de secours, mais aussi l'arrêt du système de refroidissement auquel la canalisation appartenait. Les courts circuits causés par l'eau ont eu pour conséquence la coupure du courant et l'arrêt du nœud de télécommunications. Cela a alors entraîné de graves perturbations pour le réseau de communications sans fil, notamment au niveau des services postaux, des services de transactions financières, des services d'enregistrement à l'aéroport... |
| Effets d'aggravation     | Une rupture d'un tuyau provoque des perturbations majeures des télécommunications sur une zone très étendue et pour des services essentiels comme la banque, et l'aéroport, mais aussi le système de supervision du réseau électrique   |





#### 1.2.2.4. Inondations en 2002, Prague (République Tchèque)

Les inondations qui ont touché Prague (République Tchèque) en 2002 faisaient partie d'un événement transfrontalier d'une ampleur extrême ayant impacté plusieurs États d'Europe de l'Est. De fortes pluies début d'août ont déclenché des vagues d'inondations successives, et les crues des principaux fleuves (l'Oder, le Neiss, l'Elbe, la Mulde, le Danube et la Vltava) ont inondé la République Tchèque, l'Allemagne, l'Autriche, la Slovaquie... Ces événements ont entraîné des pertes humaines et matérielles très importantes, et font notamment référence concernant la vulnérabilité des réseaux de métro souterrains aux inondations.

Parmi les nombreux incidents répertoriés à Prague, nous nous intéressons ici aux impacts sur les réseaux d'eau (eau potable et assainissement). Les inondations ont en effet provoqué des défaillances dans la production et le traitement de l'eau potable, mais aussi dans le traitement des eaux usées. D'une part, la submersion des usines de production d'eau potable en bord de la Vltava ont perturbé fortement leur activité, mais l'eau prélevée dans le fleuve pour être traitée était également très polluée, du fait du charriage de déchets et de carcasses d'animaux mais aussi du fait du transport par les courants de résidus de produits toxiques présents dans les sites industriels situés le long du fleuve. Et plus d'une centaine de stations de traitement des eaux usées ont été endommagées, ce qui a entraîné une augmentation de la pollution organique (Buzna et al., 2007). Des surpressions et résurgences sont survenues dans le réseau d'assainissement, dont plusieurs infrastructures telles que des clapets anti-retour ont cédé. De plus, une manœuvre de mise à l'abri de substances toxiques à l'usine chimique Spolana de Neratovice, qui produisait des herbicides et des produits chimiques, a eu pour conséquence une fuite importante de chlore (et de mercure dans une moindre mesure) dans les eaux du fleuve en crue, et donc une grave pollution. Finalement, les tests ont mis en évidence une forte augmentation des niveaux d'arsenic et de plomb, probablement à partir de terrils et de dépôts de déchets, une pollution au chlore importante, mais aussi un risque élevé de propagation de la Salmonelle et d'Hépatite A (Pescaroli & Kelman, 2017). Les solutions palliatives mises en place dans l'urgence ont donc évolué de séchoirs portatifs, de pompes flottantes ou de pompes électriques submersibles vers des vaccins contre l'hépatite, des gamma globulines et des désinfectants (Pescaroli & Kelman, 2017).

Tableau 11 : Analyse d'une chaîne de défaillances lors des inondations à Prague (République Tchèque) en 2002.

|                          | Description  |
|--------------------------|--|
| Evènement initiateur     | Pluies torrentielles et crue   |
| Réseaux touchés          | Réseau d'eau potable, réseau d'assainissement  |
| Processus de propagation | Propagation principalement géographique  |
| Séquence d'événements    | Des pluies torrentielles ont été à l'origine d'une crue de la Vltava, qui a eu entre autres pour conséquence la submersion de bâtiments industriels, d'infrastructures de traitement des eaux potables et usées, mais aussi le charriage de déchets. Les usines d'eau potable ont alors dû faire face à des fuites de substances toxiques à la suite de manipulations lors de leur évacuation, associées au déversement d'eaux polluées et de charriage de déchets polluants dans le fleuve. |

|                      |   |
|----------------------|---|
|                      | Ces pollutions ont aggravé la défaillance du système de production d'eau potable, qui était déjà touché par la submersion des infrastructures et par le déversement d'eaux usées depuis les systèmes de traitement. |
| Effets d'aggravation | Aggravation par des erreurs humaines, par le fonctionnement du cycle de l'eau, impacts directs sur la santé des habitants, de la faune et de la flore   |

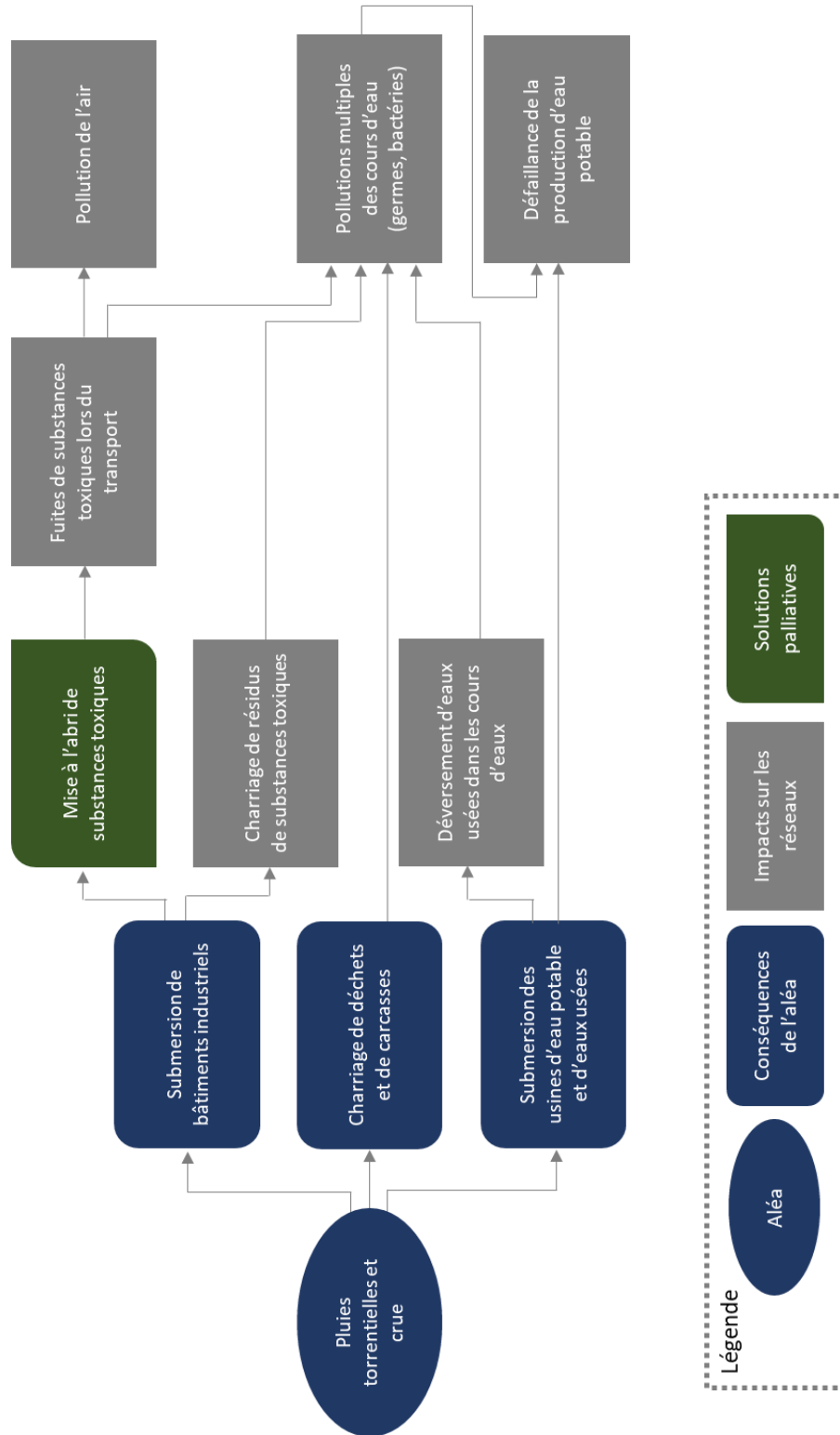


Figure 31 : Séquence d'événements d'une chaîne de défaillances lors des crues survenues autour de Prague (République Tchèque) en 2002.

### 1.2.2.5. Séisme et tsunami à la centrale de Fukushima, 2011, Japon

Le 11 mars 2011, le Japon a connu une série de catastrophes majeures, qui ont mis à rude épreuve ce pays par ailleurs familier des catastrophes naturelles du fait de sa géographie. Un tremblement de terre d'une magnitude 9 sur la côte nord-est de Honshu a initié l'incident, causant une première série de dégâts importants sur la terre ferme. En plus des dommages humains, les ondes sismiques ont provoqué des dommages structurels sur les réseaux de télécommunications terrestres et sous-marins, de transport routier/portuaire/ferré, d'électricité, d'eau potable, d'assainissement etc. (Pescaroli & Kelman, 2017). Le séisme a alors déclenché une série de grandes vagues de tsunami, dont la hauteur pouvait aller jusqu'à 40 mètres et qui ont pour certaines parcouru 10 kilomètres à l'intérieur des terres. Ces vagues ont dévasté la région et d'autres zones côtières du nord-est du pays- on a dénombré aux alentours de 20 000 victimes - et ont notamment submergé la centrale nucléaire de Fukushima Dai Ichi. La submersion ou l'endommagement par le séisme des infrastructures électriques, mais aussi des générateurs de secours (qui n'étaient pas à l'abri et donc certains ont été entraînés par les eaux), ont entraîné une coupure du courant électrique dans la centrale, ce qui a résulté en la coupure du système de climatisation / refroidissement. La surchauffe qui a suivi a eu pour conséquence la fusion et la destruction des trois réacteurs nucléaires (Guarnieri et al., 2015; McGee et al., 2014). Les risques sanitaires et physiques d'une part, et les dommages subis par les infrastructures des différents réseaux nécessaires d'autre part, ont rendu la phase d'évacuation et de secours aux victimes très difficile. Cet événement illustre l'occurrence d'un des pires scénarios probables de par l'interaction entre les aléas naturels et les aléas technologiques. Le même événement physique initial a généré trois événements différents (le séisme, le tsunami, l'accident nucléaire), qui ont engendré trois catastrophes différentes. Le séisme a en effet provoqué une séquence d'effets en cascade dont la complexité et la gravité ont augmenté dans le temps et dans l'espace en raison de l'interaction des différents aléas, dommages et systèmes (Pescaroli & Alexander, 2015).

Tableau 12 : Analyse d'une chaîne de défaillances lors du séisme à Fukushima (Japon) en 2011.

|                          | Description  |
|--------------------------|--|
| Evènement initiateur     | Séismes  |
| Réseaux touchés          | Tous les réseaux   |
| Processus de propagation | Propagation physique, cybernétique, géographique   |
| Séquence d'événements    | Le séisme a provoqué tout d'abord des dommages structurels sur les réseaux électriques, de télécommunications et de transport. Le tsunami a alors entraîné la submersion d'infrastructures électriques, notamment au niveau de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, mais aussi des générateurs de secours de la centrale. La coupure du courant induite a alors provoqué l'arrêt du système de refroidissement de la centrale, menant à la fusion et la destruction de trois réacteurs. |
| Effets d'aggravation     | L'effet d'aggravation est ici plus difficile à identifier et souligner vu l'importance de l'évènement initiateur, même si la problématique des générateurs de secours et des télécommunications est claire.  |

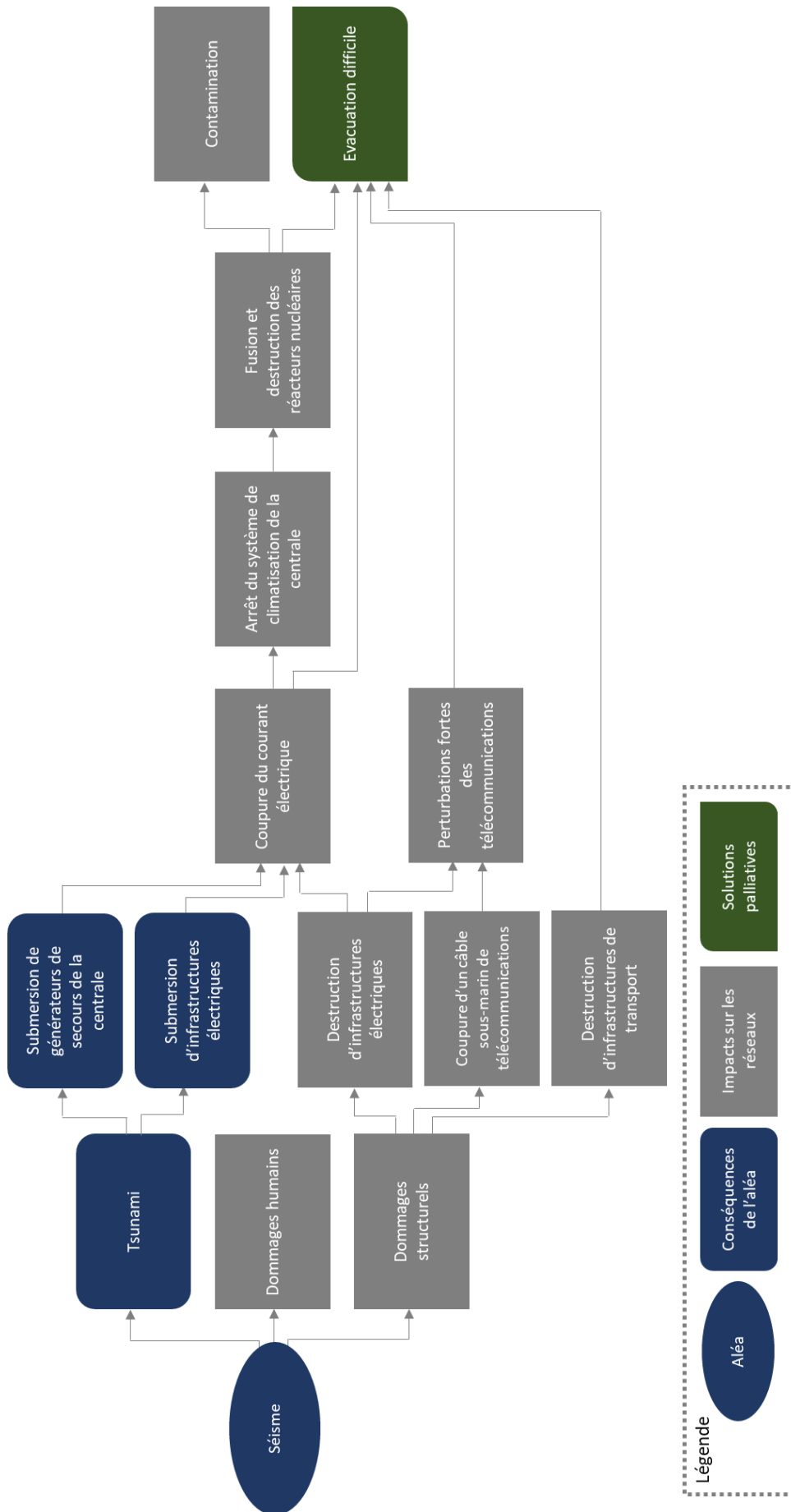


Figure 32 : Séquence d'événements d'une chaîne de défaillances lors du séisme ayant touché le Japon en 2011.

### 1.2.3. Synthèse des enseignements tirés des cas d'étude

Les différents événements étudiés dans ce chapitre nous permettent déjà de souligner leur diversité, que ce soit en termes d'événements initiateurs, de dépendances observées, des réseaux touchés, des échelles spatiales, temporelles, techniques et organisationnelles considérées... Nous présentons ci-dessous des éléments d'analyse pour les différentes caractéristiques étudiées.

#### **Evènement initiateur**

Les événements initiateurs sont souvent naturels et de grande ampleur mais peuvent également être d'origine accidentelle et d'ampleur très limitée, comme l'illustre l'exemple de la rupture d'une petite canalisation d'eau à Rome (Italie) en 2004 qui a entraîné une cascade ayant pour conséquence la défaillance de la majeure partie du système de télécommunications aux alentours de Rome. Certains événements semblent particulièrement enclins à initier des cascades, notamment les incendies et les explosions (Necci et al., 2015b).

Nous observons que l'interaction et la concomitance de plusieurs événements initiateurs peut déclencher des séquences particulièrement dommageables, comme l'illustre de façon dramatique la catastrophe de Fukushima, où la combinaison du séisme, du tsunami et de la fusion des réacteurs nucléaires a démultiplié les conséquences de ces événements.

Nous pouvons ici faire écho à notre cas d'étude, présenté dans la dernière partie du manuscrit, qui se rapporte à l'aléa de crue majeure au sein de l'agglomération francilienne. Cette crue est notamment caractérisée par la lenteur de la montée et descente des eaux, ce qui nous amène à penser que cet événement serait particulièrement initiateur de cascades. En effet, les perturbations parmi les réseaux techniques et les dégâts engendrés par l'aléa seraient très importants, et ce notamment suite à la présence de l'eau pendant plusieurs semaines voire plusieurs mois.

#### **Réseaux touchés**

Les recensements réalisés et notre propre étude comparative nous amènent à considérer que les défaillances en cascades peuvent concerner tous les réseaux techniques (urbains ou non). Les réseaux d'énergie et de télécommunications semblent les plus « agressifs » envers les autres réseaux, bien que ceux-ci puissent également avoir des conséquences importantes. On observe en effet que la quasi-totalité des réseaux d'aujourd'hui sont dépendants d'une alimentation électrique, mais aussi des systèmes de télécommunications.

#### **Processus de propagation**

Les dépendances sous-jacentes à la propagation de défaillances sont très souvent physiques, mais les dépendances géographiques, cybernétiques et sociales (dans une moindre mesure) sont également illustrées. L'exemple du blackout électrique en Californie (USA) en 2000 illustre ainsi la manière dont des phénomènes plus politiques et économiques peuvent également résulter en des défaillances en cascades majeures.

Des travaux de recherche ont porté sur l'étude empirique des défaillances en cascade et ont permis de faire plusieurs observations intéressantes (Luiijf et al., 2008; Luiijf et al., 2010), notamment que les interdépendances mutuelles n'occurrent qu'extrêmement rarement, ce qui conforte notre choix du terme d'(inter)dépendance. Nous soulignons toutefois que des boucles de rétroactions sont possibles, mais plutôt au niveau d'un service qu'au niveau d'une infrastructure. L'exemple de la boucle de rétroaction entre le réseau de gaz et le réseau électrique pour le cas du blackout électrique en Californie en est une illustration.

Ces mêmes travaux évoquent une différence entre les proportions des divers types de vulnérabilité à l'origine des scénarios de cascade, avec par exemple une part plus importante occupée par la vulnérabilité provenant des dépendances pour l'Union Européenne par rapport aux USA, selon les modes d'organisation et de gestion des infrastructures et des réseaux (Luiijf et al., 2008; Luiijf et al. 2010).

### **Séquence d'événements**

Les défaillances en cascade sont potentiellement des événements multi-échelles, multisectoriels, et multi-granulaires. Ils peuvent se propager d'une échelle très locale à une échelle régionale voir internationale, d'un secteur particulier à de nombreux secteurs divers, et d'une infrastructure unique à des systèmes de systèmes complexes. C'est ainsi que la défaillance d'une infrastructure locale mineure comme une canalisation d'eau peut résulter en la défaillance généralisée du réseau régional de télécommunications.

Les différentes études et analyses réalisées permettent également d'observer que les scénarios de défaillances en cascade entre différents réseaux sont d'un ordre généralement faible, avec un maximum observé égal à quatre (Luiijf et al., 2008). Les exemples étudiés ci-dessus semblent correspondre à cette caractéristique.

### **Effets d'aggravation**

Les quelques cas étudiés, et l'analyse de la littérature, nous confirme que des effets d'aggravation surviennent suite à la propagation et à la diffusion des perturbations dans l'espace et dans le temps. Les défaillances en cascade ont en effet pour conséquences l'augmentation du nombre d'infrastructures touchées, du nombre de services défaillants, de l'étendue des zones perturbées, du temps de retour à la normale, etc. L'aggravation peut également être la traduction de la survenance de défaillances en escalade.

Nous observons également que la «topologie» ou structure des réseaux et des infrastructures critiques a par ailleurs une influence sur la capacité de compartimenter les défaillances et ainsi atténuer les effets en cascade (Glass Jr et al., 2004), et donc la robustesse du système (Lhomme, 2012). Il semble que les réseaux homogènes très maillés peuvent supporter plus de perturbations avant l'apparition de phénomènes de cascade, mais que lorsqu'ils finissent par tomber, ils ont tendance à défaillir dans leur intégralité.

### 1.3. CONCLUSION

L'étude des événements se révèle être un vecteur important pour une meilleure compréhension des phénomènes de défaillances en cascade à travers l'analyse des contextes dans lesquels ils s'inscrivent, les situations au sein desquelles ils surviennent, les impacts qu'ils entraînent... L'analyse des retours d'expérience et des événements passés est en effet un des rares canaux pour obtenir des informations plus ou moins détaillées concernant des scénarios de cascade. Ces études empiriques, dans la littérature ou dans notre portfolio d'événements passés, nous apprennent ainsi que les défaillances en cascade ne sont pas des événements très rares, qu'ils touchent l'ensemble des réseaux techniques urbains (bien que certains soient plus souvent impliqués que d'autres car de nombreux réseaux en dépendent, comme l'électricité ou les télécommunications), et que la propagation et l'aggravation des impacts se fait par le biais des diverses relations d'(inter)dépendances existantes entre les infrastructures.

Ces retours d'expérience permettent également de confirmer que ces événements sont potentiellement multi-sectoriels, multi-dimensionnels et multi-scalaires, ce qui participe à leur complexité et à la difficulté de les modéliser et de les prévoir. Cette question fera d'ailleurs l'objet de réflexions plus approfondies dans la partie II, qui s'intéresse aux approches d'étude et de modélisation de ces phénomènes complexes et critiques.

## CONCLUSION DE LA PARTIE I

Les réseaux techniques urbains sont des systèmes complexes indispensables au fonctionnement de la ville. Ces réseaux et leurs infrastructures peuvent être considérés comme des infrastructures critiques, qui demeurent vulnérables aux différents aléas auxquels ils peuvent être exposés. Nous considérons de plus que leurs dépendances à d'autres systèmes constituent une des composantes de leur vulnérabilité. Ces relations de dépendance sont dynamiques et complexes, et peuvent être de différentes natures : physique, géographique, cybernétique et logique ou sociale.

Ces dépendances sont à l'origine des défaillances en cascade, phénomènes de propagation des défaillances d'un système, engendrées par un événement initial, à d'autres systèmes. Cette propagation physique, cybernétique, logique ou géographique se fait par le biais de dépendances entre les systèmes et entraîne l'apparition d'événements d'ordre supérieur et l'aggravation progressive des impacts de l'événement initial. Ce sont des phénomènes complexes, multi-sectoriels, multi-dimensionnels, multi-scalaires, et dynamiques. Ils peuvent impliquer des systèmes complexes, nombreux et variés, ce qui les rend difficiles à prévoir et à modéliser. Ils entraînent par ailleurs l'augmentation de la vulnérabilité des systèmes urbains, et rendent les processus de récupération et de relèvement plus longs et plus difficiles.

Ces conclusions nous amènent à considérer l'intérêt de l'amélioration de notre niveau de connaissance, que ce soit après ou avant leur survenue, et de façon empirique ou grâce des modèles. Des processus d'analyse et de modélisation peuvent en effet être utiles à l'amélioration des connaissances et des prévisions des (inter)dépendances et défaillances en cascade au sein des réseaux techniques urbains.

L'étude, l'identification, l'analyse, et la modélisation de ces phénomènes peut alors permettre de :

- Mieux comprendre ces phénomènes complexes
- Identifier de nouvelles dépendances entre les systèmes
- Identifier des nœuds particulièrement vulnérables et/ou critiques des réseaux étudiés
- Identifier des scénarios de défaillances en cascade particulièrement probables et/ou critiques
- Evaluer les impacts directs et indirects d'un aléa sur un territoire
- Consolider les relations entre les parties prenantes, notamment les différents gestionnaires de réseaux
- Former et entraîner les parties prenantes sur le sujet
- Produire des éléments nouveaux pour l'aide à la décision et la gouvernance, notamment pour prioriser et planifier des mesures de protection, de mitigation, des solutions palliatives, des stratégies de récupération....
- Tester des alternatives de fonctionnement à l'étude, et réaliser des analyses de type « what-if »
- Consolider des décisions en gestion de crise



Ce sujet est aujourd'hui au cœur de plusieurs initiatives, dans lesquelles les développeurs cherchent à construire des méthodologies et des outils pour aider les parties prenantes à remplir un ou plusieurs de ces objectifs. Ces initiatives se révèlent nombreuses, diverses et complexes (Eusgeld et al., 2008; Grangeat et al., 2015; Ouyang, 2014; Pederson et al., 2006; Pye & Warren, 2007; Rigole & Deconinck, 2006; Satumtira & Dueñas-Osorio, 2010; Setola et al., 2017).

Elles sont par ailleurs ardues à analyser pour des décideurs et acteurs opérationnels non familiers du sujet. Au vu de leur variété et du peu d'informations disponibles à leur égard, un état de l'art et une analyse comparative apparaissent délicats, tout particulièrement pour ces acteurs.

Nous nous intéressons donc par la suite au recensement et à la caractérisation des initiatives existantes pour l'étude et la modélisation des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade au sein des réseaux techniques urbains. La question du choix d'une approche adaptée à un contexte donné sera également au centre de nos préoccupations. Ce travail nous permettra finalement de réaliser un diagnostic de la situation au niveau de l'agglomération parisienne, pour identifier les possibilités d'applications pour améliorer la prise en compte et la prévision des (inter)dépendances et des défaillances en cascade au sein des réseaux techniques urbains.

PARTIE II - ETUDIER ET MODELISER  
LES (INTER)DEPENDANCES ET LES  
DEFAILLANCES EN CASCADE : ETAT  
DE L'ART, TYPOLOGIE, MISE EN  
OEUVRE ET AIDE AU CHOIX

## PREAMBULE DE LA PARTIE II

La partie I a permis d'introduire, de définir et de caractériser les phénomènes d'(inter)dépendances au sein des réseaux techniques urbains et de leurs infrastructures, et les défaillances en cascade qui en découlent. Elle nous a également permis de souligner leur importance, leur complexité et leur criticité, mais aussi le manque d'informations qui s'y rapportent. Ces conclusions nous ont amenés à considérer l'intérêt de l'amélioration de notre niveau de connaissance et donc de leur étude et de leur modélisation.

L'objectif est alors de développer des démarches et des outils pour aider les parties prenantes - y compris les gestionnaires de réseaux, les acteurs de la gestion de crise, les principaux responsables de la sécurité civile ou les décideurs - à identifier des scénarios de défaillances en cascade afin d'envisager des solutions, participer à la planification de crise, ainsi que consolider la prise de décision en matière de gestion de crise.

Cette question de prévision, d'étude et de modélisation se situe au cœur de la deuxième partie de ce manuscrit. Composée de trois chapitres, cette partie a pour objectif d'apporter des éléments de connaissance, d'analyse et d'aide au choix aux potentiels porteurs et utilisateurs d'une démarche d'analyse et de modélisation des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade. L'objectif est de s'adresser ici autant aux parties prenantes opérantes qu'aux chercheurs ou développeurs d'une démarche ou d'un outil.

Afin de construire une réflexion documentée, le quatrième chapitre identifie et dresse un portrait des différentes méthodes et démarches utilisées aujourd'hui à travers un état de l'art. Après avoir explicité les objectifs poursuivis, nous proposons une méthodologie pour la construction de cet état de l'art et un échantillon d'initiatives étudiées. A partir d'une revue bibliographique, il s'agit d'expliciter les résultats de cet état de l'art selon diverses caractéristiques identifiées comme pertinentes, notamment pour un public profane. Ce chapitre est également l'occasion de discuter des typologies et taxinomies existantes pour catégoriser ces démarches dans la littérature, de leurs limites, et de proposer une nouvelle typologie prenant à la fois en compte les aspects scientifiques et les aspects plus opérationnels, basée notamment sur les principes d'analyse ascendante et descendante.

Le cinquième chapitre s'intéresse quant à lui à la mise en œuvre de ce type de démarche, et surtout aux défis et difficultés relatifs à celle-ci. Il a pour objectif d'illustrer et de discuter des principes et des enjeux sous-jacents à la mise en œuvre d'une démarche sur une zone d'étude réelle. A travers les enseignements de l'état de l'art effectué et des expériences des différents projets de recherche auquel nous avons participé, ce chapitre permet notamment de soulever les défis relatifs à l'implication des parties prenantes locales, au recueil des données, et à la question de granularité de la modélisation.

Le sixième chapitre amène finalement la question d'aide au choix pour des parties prenantes opérationnelles, grâce aux enseignements des chapitres précédents. A l'aide des observations et réflexions menées, nous proposons différents éléments à prendre en compte lors du choix, du développement et de la mise en œuvre d'une démarche dans un contexte opérationnel réel donné. Ce chapitre est finalement l'occasion de proposer des recommandations pour garantir l'adéquation d'une démarche à son contexte, et de dresser des profils-types de démarches selon les objectifs opérationnels poursuivis.

CHAPITRE 4 : Etat de l'art des méthodes et démarches pour l'identification, l'analyse et la modélisation des (inter)dépendances et des défaillances en cascade et proposition d'une typologie.



CHAPITRE 5 : Analyse empirique des limites à la mise en œuvre de ces démarches.



CHAPITRE 6 : Propositions pour sélectionner, construire et mettre en œuvre une démarche adaptée au contexte et porteuse d'avancées.

# CHAPITRE 4 : ETAT DE L'ART DES DEMARCHES ET PROPOSITION D'UNE TYPOLOGIE DES APPROCHES

Ce quatrième chapitre a pour premier objectif de dresser un panorama général des initiatives visant l'analyse et la modélisation des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade recensées aujourd'hui à travers le monde. Il a pour ambition de les caractériser et de les décrire sous un angle plus profane, grâce à des caractéristiques objectives factuelles.

Les enjeux de cet état de l'art et les questions scientifiques relatives sont tout d'abord présentés, pour introduire la présentation de la méthodologie utilisée. Les résultats obtenus sont ensuite présentés et illustrés selon les différentes caractéristiques étudiées parmi les démarches, et les enseignements de ce premier état de l'art sont ensuite soulevés.

Il apparaît alors que les différentes recherches recensées – de par l'absence de contexte et de définitions communes notamment – sont très variées en termes de disciplines, de résultats ciblés, d'objets analysés, de données d'entrée nécessaires, d'échelles étudiées, de méthodes utilisées, de processus de mise en œuvre et de degré de participation. Par conséquent, une analyse comparative de ces démarches – notamment à des fins de sélection pour une mise en œuvre – devient délicate. La question des typologies émerge alors et fera l'objet de la suite de ce chapitre.

Un panorama des taxonomies existantes et de leurs limites est tout d'abord effectué. Dans l'objectif d'introduire des éléments plus opérationnels, les notions d'approches ascendantes et descendantes sont alors introduites. Nous proposons ensuite une typologie plus globale, basée notamment sur ces principes. Cette opposition est cependant considérée comme dépassée par certaines approches, et une troisième catégorie est donc proposée : l'approche fédératrice.

## 4.1. JUSTIFICATION, OBJECTIFS ET METHODOLOGIE DE L'ETAT DE L'ART

### 4.1.1. L'étude des (inter)dépendances et défaillances en cascade au sein des réseaux techniques urbains : enjeux et questionnements

Le sujet des phénomènes d'(inter)dépendances au sein de réseaux urbains et d'infrastructures critiques revêt désormais une importance capitale, tant du point de vue politique et économique que du point de vue des normes et des réglementations, ce qui se traduit par une augmentation du financement de la recherche sur le sujet. Le nombre d'appels à projets thématiques dédiés augmentent notamment au niveau des projets ANR et H2020, ainsi que le nombre de projets de recherches dédiés. En effet, les méthodes classiques d'analyse de la vulnérabilité et des risques ne peuvent pas saisir les complexités structurelles et dynamiques de ce type de systèmes complexes (Zio, 2016).

Les défaillances en cascade, notamment mises en évidence par la Déclaration de Sendai de 2015 (UNISDR, 2015), constituent un sujet de recherche majeur depuis plusieurs années, principalement dans le cadre de travaux axés sur la protection des infrastructures critiques (Eusgeld et al., 2008;

Grangeat et al., 2015; Ouyang, 2014; Pederson et al., 2006; Pye & Warren, 2007; Rigole & Deconinck, 2006; Satumtira & Dueñas-Osorio, 2010; Setola et al., 2017).

Il est donc nécessaire de développer de nouvelles méthodes qui soient capables de considérer le problème sous ses différentes perspectives topologiques, fonctionnelles, dynamiques, et qui soient adaptées à la grande complexité de ces systèmes et de leurs interactions et aux incertitudes associées (Kröger & Zio, 2011). Les réseaux techniques urbains sont en effet des systèmes de systèmes, mais aussi des systèmes complexes, comme explicité précédemment. Ces systèmes se caractérisent notamment par les concepts d'auto-organisation, de non-linéarité, de comportements émergents (Sharif & Irani, 2006).

Nous assistons ainsi à une multiplication des projets de recherche et des cadres méthodologiques pour étudier ces phénomènes dans l'objectif d'aider à les identifier, les caractériser, les modéliser voire les prédire, et ce à des échelles et des granularités très diverses. Les recherches peuvent être très variées en termes de disciplines impliquées (géographie, sécurité industrielle, informatique, génie civil, etc.), de résultats ciblés, d'objets étudiés, de données requises, d'échelles étudiées, de méthodes appliquées, de processus de mise en œuvre et de degré d'implication des parties prenantes. Par conséquent, une analyse comparative de ces méthodologies mises en œuvre pour la modélisation des (inter)dépendances et des défaillances en cascade - notamment à des fins de sélection - devient délicate, car elles ne partagent pas de cadre commun et ne sont pas identifiées de manière centralisée et organisée.

Afin de fournir des éléments d'aide à la décision aux parties prenantes, plusieurs questions ont été identifiées. Ces analyses permettront d'identifier des points de convergence et de divergence partagés par les initiatives étudiées, ainsi que des spécificités ou de potentiels avantages et inconvénients de chacune.

Les questions posées sont énumérées ci-dessous:

- Quels sont les objectifs de ces démarches ? Les objectifs poursuivis détermineront le type de résultats à obtenir à la sortie, et donc la manière dont les phénomènes seront étudiés, formalisés et modélisés.
- Qui est demandeur du développement de ces initiatives, si cette demande existe ? Qui est responsable du développement de ces initiatives et qui en est l'utilisateur ? Les responsables peuvent influencer le degré d'opérationnalisation, les processus de mise en œuvre, mais aussi la manière dont elles ont été construites. Les types de développeurs et d'utilisateurs peuvent également être un bon indicateur dans un processus de décision.
- Comment sont structurées les architectures de modélisation ? L'architecture technique, souvent composée d'un entrelacement de techniques de modélisation différentes, constitue une dimension majeure de l'analyse. Il conditionne la manière dont les phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade sont formalisés et modélisés, et donc les données d'entrée, le type d'objets modélisés, les résultats, etc.
- Quels objets sont modélisés ? Le type d'objet modélisé, c'est-à-dire le type de services urbains, mais aussi le type d'infrastructures, est également un facteur majeur dans un processus de choix potentiel.
- À quelles échelles ces initiatives sont-elles mises en œuvre ? Pour quel niveau de granularité et niveau de précision ? Ces questions complexes et complémentaires sont essentielles pour

choisir une démarche pertinente dans un contexte donné. Les échelles et le niveau de granularité auront une influence sur les données nécessaires, les méthodes utilisées et les processus de mise en œuvre, mais surtout sur les types de résultats obtenus.

- Quel type de données est utilisé comme intrants ? Les types de données nécessaires au fonctionnement des différentes démarches, liées à l'architecture et à la granularité, constituent un bon indicateur pour les parties prenantes souhaitant mettre en œuvre une étude des (inter)dépendances et des défaillances en cascade des réseaux urbains et de leurs infrastructures.
- Comment sont présentés les résultats ? Les types de données présentés dans les résultats des initiatives étudiées, fortement liés aux objectifs poursuivis, indiquent la manière dont les résultats obtenus peuvent être utilisés.
- Quels types d'événements initiateurs sont pris en compte ? Selon les aléas pris en compte et leurs dynamiques, les méthodologies peuvent différer considérablement.

Ces interrogations ont alors constitué les différentes facettes de notre analyse, présentée ci-dessous.

#### 4.1.2. Méthodologie de l'état de l'art des démarches existantes

Afin de tenter de répondre à ces questions, nous avons réalisé un état de l'art des démarches existantes. Pour compléter cet état de l'art, un panorama des classifications et typologies proposées dans la littérature a été réalisé par la suite. L'analyse critique de ces classifications nous a amené à identifier leurs limites dans le cadre d'un processus d'aide au choix pour une mise en œuvre, avec la proposition d'une typologie plus globale.

Ce chapitre retrace les travaux effectués dans ce sens. Ceux-ci ont pour objectif de constituer une première étape d'un processus d'aide au choix pour sélectionner ou développer une démarche adaptée à un contexte donné, en s'intéressant notamment à des caractéristiques plus opérationnelles.

##### 4.1.2.1. Sélection de l'échantillon

Compte tenu du nombre et de la diversité des initiatives actuelles (Ouyang, 2014; Yusta et al., 2011; Zio, 2018), nous avons circonscrit un cadre approprié aux objectifs de notre recherche et au contexte de notre étude, à savoir les réseaux techniques urbains et leurs infrastructures susceptibles d'être affectés par un risque majeur. Les travaux analysés portent principalement sur l'étude globale des (inter) dépendances et des défaillances en cascade au sein des infrastructures essentielles et des réseaux urbains. Les aléas auxquels ils sont confrontés sont naturels (et potentiellement accidentels ou humains) et peuvent être concomitants. De plus, ces démarches doivent pouvoir être testées ou même utilisées dans un contexte opérationnel et ne pas rester théoriques.

Nos travaux se sont ensuite concentrés sur la collecte d'informations : recherches bibliographiques, scientifiques et techniques, symposiums et conférences, et entretiens avec des spécialistes. Ce travail a suivi les principes de la revue systématique qualitative. Les références ont été recherchées à l'aide des bases de données Scopus et Web of Science en utilisant les mots-clés suivants : ("urban networks" OR "critical infrastructure" OR "essential infrastructure") AND ("modelling" OR "simulation" OR "identification") AND ("cascading failures" OR "cascading effects" OR "domino effects" OR

“interdependencies”). En parallèle des articles identifiés grâce aux bases de données, des articles supplémentaires identifiés avant ce travail ou lors d'entretiens et de réunions informelles ont été inclus (présentations des résultats de projets, présentations lors de colloques et conférences, entretiens informels avec les personnes impliquées dans le développement des approches).

Une fois les doublons supprimés, les articles restants ont été triés en fonction des titres et des résumés. Les 52 références sélectionnées décrivent 32 démarches car plusieurs documents ont parfois été utilisés pour analyser certaines d'entre elles. Elles se concentrent principalement sur l'étude large des interdépendances et des défaillances en cascade au sein des infrastructures essentielles / critiques et des réseaux urbains. L'échantillon utilisé est présenté dans le Tableau 13 de la page suivante, en indiquant le nom de la démarche s'il en existe un.

Cet échantillon sera également utilisé dans le chapitre 6. Les travaux ont été sélectionnés dans l'objectif d'obtenir une diversité représentative en fonction des types de modélisation utilisés, et la sélection n'est pas exhaustive. Les projets de recherche européens ont constitué un terreau important, de même que le travail des centres NIAC aux États-Unis, des travaux en collaboration avec le gouvernement en Australie, des articles d'état de l'art, des communications dans le cadre de conférences pour présenter la mise en œuvre d'une démarche, des thèses sur le sujet etc. Dans la mesure du possible, des entretiens ont été menés pour recueillir des informations plus spécifiques sur certaines initiatives si nécessaires.

La collecte de données a été réalisée de manière organisée afin de faciliter l'analyse et la caractérisation future des éléments. Des formulaires et des tableaux ont été construits autour de caractéristiques jugées pertinentes. Il a parfois été difficile d'obtenir des informations spécifiques sur certaines démarches - ce qui semblait occasionnellement un choix délibéré, notamment dans un souci de confidentialité – et nous avons donc décidé de ne pas répertorier les initiatives concernées pour cause de manque d'informations.

L'analyse détaillée de neuf démarches particulières est également présentée en annexe. Ces démarches se veulent représentatives de la diversité existante, et seront par la suite catégorisées selon la typologie proposée.



Tableau 13 : Présentation de l'échantillon des références utilisées.

| Démarche        | Références  |
|-----------------|---|
|                 | (Apostolakis & Lemon, 2005)   |
| ResiWater       | (Piller et al., 2017)   |
| Diesis          | (Beyer et al., 2010; Rome et al., 2009)   |
| CIP/DSS         | (Bush et al., 2005a; Bush et al., 2005b)  |
| IRIIS           | (Duflos et al., 2007)   |
| CASCEFF         | (Hassel et al., 2015; Lange et al., 2015)   |
| CISIA           | (Foglietta, 2013; Kyriakides & Polycarpou, 2014)  |
| HAZUR           | (Barreiro et al., 2017; Fontanals et al., 2014)   |
| RESCCUE         | (Barreiro et al., 2017; Evans et al., 2018; Velasco et al., 2018)                             |
| CRISMA          | (Schlobinski, 2015; Zuccarro, 2015)   |
|                 | (Fotouhi et al., 2017)  |
|                 | (Gorbil & Gelenbe, 2009)  |
|                 | (Gursesli & Desrochers, 2003)   |
|                 | (Haines et al., 2005)   |
|                 | (Hilly et al., 2018)  |
| EPOCHS          | (Hopkinson et al., 2003)  |
|                 | (Johansson & Hassel, 2010)  |
| PREDICT         | (Klaver et al., 2016)   |
| XDI             | (Laker, 2018; NSW Government, 2018)   |
| CIPMA           | (Lew, 2011; Stapelberg, 2008)   |
| FRC             | (Lhomme et al., 2011a)  |
| I2SIM           | (J. R. Marti, 2014; Wang, 2013)   |
| SNOWBALL        | (Palumbo et al., 2016; Zuccaro et al., 2018)  |
|                 | (Petit et al., 2014; Phillips & Tompkins, 2014; Portante et al., 2011; Portante et al., 2016) |
| SYNER-G         | (Pitilakis et al., 2014; Pitilakis, n.d.)   |
| DOMINO          | (Robert et al., 2013)   |
|                 | (Rozel et al., 2008)  |
| INTACT - CIRCLE | (van Ruiten et al., 2016)   |
| CIPCAST         | (Panzieri et al., 2004; Setola et al., 2017)  |
| RESILIS         | (Toubin et al., 2014)   |
|                 | (Tsavdaroglou et al., 2018)   |
|                 | (Grangeat, 2017)  |

#### 4.1.2.2. Définition des caractéristiques à analyser

L'état de l'art, et les analyses basées sur celui-ci, vont s'intéresser à ce qu'on a choisi d'appeler des « démarches » d'étude et de modélisation des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade au sein des réseaux techniques urbains. Ces démarches sont caractérisées par différentes composantes, schématisée par la Figure 33.

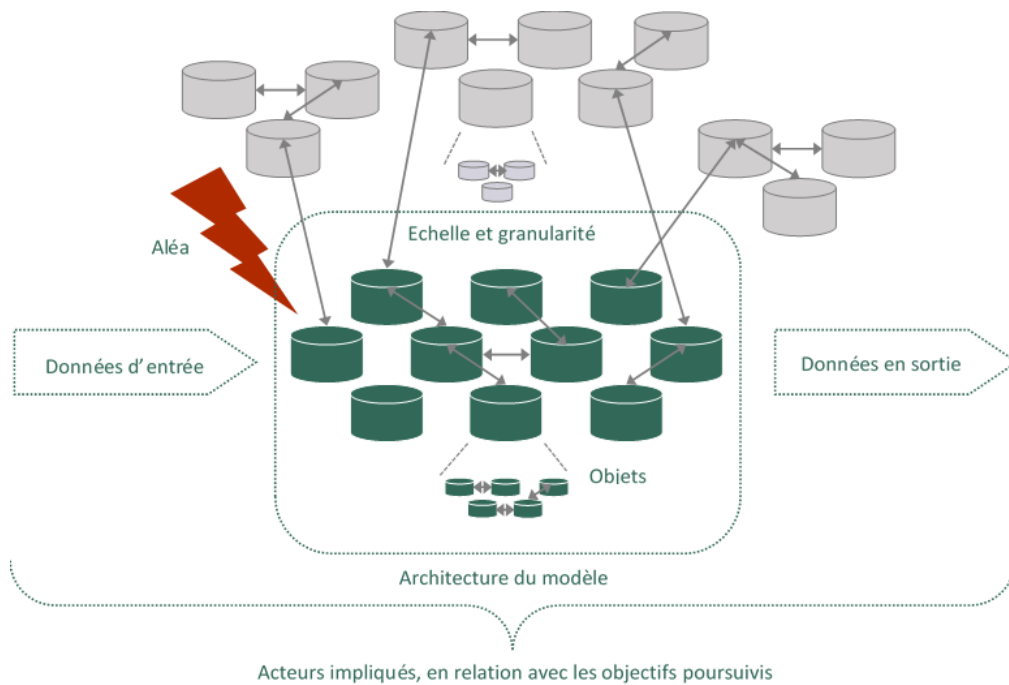


Figure 33 : Représentation schématique d'une démarche d'étude et de modélisation des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade au sein des réseaux techniques urbains.

Nous avons rapidement constaté la complexité et la diversité considérables des démarches actuellement utilisées pour étudier les (inter) dépendances et les défaillances en cascade entre réseaux urbains et infrastructures essentielles. Ce sujet est en effet à la croisée de nombreuses disciplines (géographie, ingénierie de la sécurité, informatique, physique, gestion des risques...), de problématiques (technique, de sécurité, organisationnelle, politique, économique...) et de secteurs, les définitions et les cadres théoriques connexes. Nous avons donc décidé de réaliser différentes analyses basées sur neuf caractéristiques liées au processus de mise en œuvre, inspirées des questions présentées plus haut et de la structure de ces démarches.

1. Les objectifs poursuivis
2. Les demandeurs, porteurs et utilisateurs
3. Les architectures mobilisées
4. Les objets modélisés
5. Les échelles et granularité possibles
6. Les données nécessaires en entrée
7. Les données obtenues en sortie
8. Les aléas pris en compte

Ces analyses permettent d'identifier des points de convergence et de divergence partagés par les démarches étudiées. Les résultats nous conduiront ensuite à proposer une typologie.

## 4.2. CARACTERISATION DES INITIATIVES ETUDIEES

Nous présentons ci-dessous certaines des analyses réalisées, basées sur l'état de l'art des initiatives de l'échantillon à travers les 8 caractéristiques présentées plus haut.

### 4.2.1. Objectifs poursuivis

La revue des différentes initiatives existantes nous a permis d'identifier différentes phases du processus d'étude des (inter)dépendances et des défaillances en cascade, qui peuvent alors correspondre à différents objectifs. Ainsi, les processus d'étude et d'analyse de ces phénomènes peuvent simplement viser leur identification, mais peuvent aussi avoir pour objectif leur formalisation, voire leur modélisation et leur simulation, et peuvent aller jusqu'à ambitionner une aide à la décision. Les étapes identifiées, correspondant aux objectifs des initiatives de notre échantillon, sont présentées dans le Tableau 14.

Tableau 14 : Les différentes étapes identifiées pour le processus d'étude des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade.

| Etapes  | Description   |
|---|---|
| Identification des (inter) dépendances  | Déterminer les différentes dépendances et (inter)dépendances existantes entre les composants ou objets              |
| Formalisation des (inter) dépendances   | Adopter des structures formelles choisies pour réduire les connaissances récoltées à un format favorisant l'analyse |
| Modélisation des relations d'(inter)dépendances et des défaillances en cascade induites | Etablir des règles analytiques ou algorithmiques représentant les phénomènes et leurs relations                     |
| Simulation de scénarios de défaillances   | Réaliser des itérations du modèle permettant l'identification de potentielles évolutions                            |
| Aide la décision  | Exploiter les données produites pour l'aide à la décision dans la recherche de limitation des phénomènes en cascade |

Les références étudiées couvrent ainsi tout ou partie des étapes énumérées, et leur mode opératoire ainsi que leur architecture diffèrent en conséquence. Certaines se contentent d'identifier et de formaliser des relations de dépendances tandis que d'autres modélisent à l'aide d'un modèle adapté les évolutions des comportements des réseaux considérés et de leurs infrastructures selon les occurrences potentielles de défaillances en cascade. Certaines initiatives vont même jusqu'à produire des éléments d'aide à la décision concernant des choix de mesures à prendre pour limiter ces phénomènes par exemple.

Nous présentons ici quelques exemples de la diversité des objectifs rencontrés au cours de nos recherches. D'un côté, l'outil Circle (« Critical Infrastructures: Relations and Consequences for Life and Environment ») développé dans le cadre du projet de recherche Intact (van Ruiten et al., 2016) par Deltares vise à aider à l'identification, la formalisation et la représentation des (inter)dépendances de manière collaborative et interactive, en se concentrant donc sur les premières étapes du tableau précédent. Des ateliers collaboratifs entre les parties prenantes sont organisées, au cours desquels

ceux-ci sont invités à identifier et représenter les liens de dépendances et les conséquences des différentes défaillances attendues selon un scénario donné, comme illustré par la Figure 34.

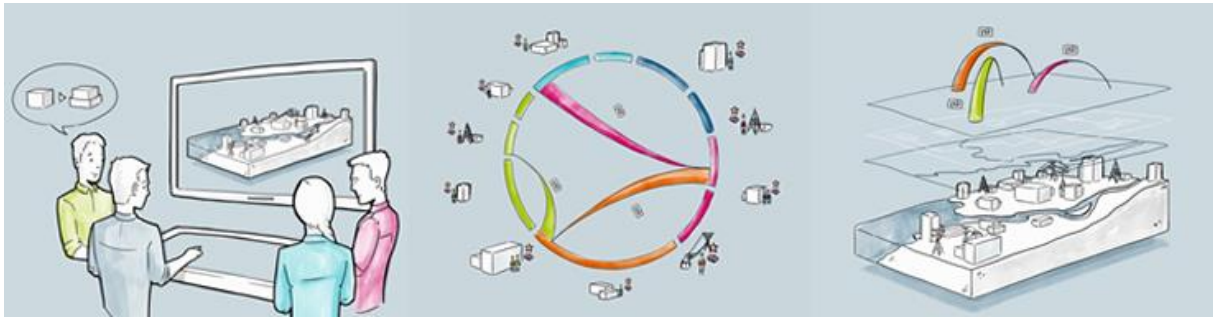


Figure 34 : Utilisation collaborative de l'outil Circle. Source : (<https://www.deltares.nl/en/software/circle-critical-infrastructures-relations-and-consequences-for-life-and-environment-2/>).

De l'autre côté, le projet Snowball a travaillé sur des outils permettant une analyse multicritère pour la hiérarchisation des stratégies d'atténuation en fonction des scénarios potentiels d'échec en cascade identifiés, c'est-à-dire les dernières étapes identifiées dans le tableau précédent (Palumbo et al., 2016). Pour chaque scénario simulé, une évaluation de l'efficacité des actions alternatives est réalisée (évacuation de la population par exemple), en affichant une carte et une comparaison sous forme de tableau pour chacune des options étudiées, qui représentent la réduction des dommages et des impacts. Les options peuvent ensuite être comparées grâce à des analyses multicritères via un algorithme de décision.

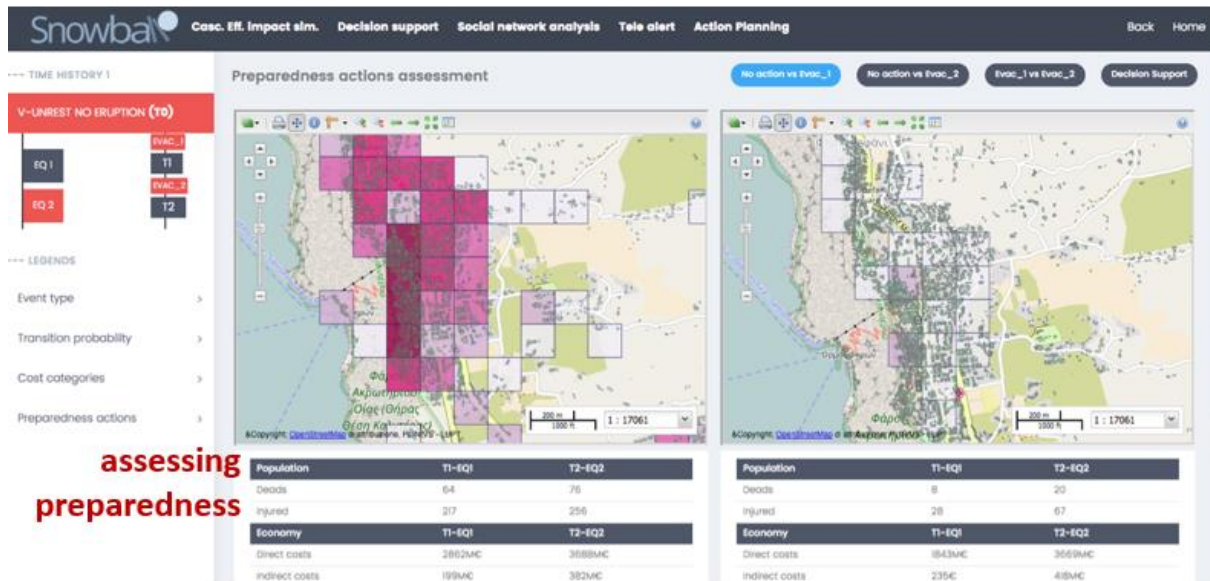


Figure 35 : Comparaison des effets de deux stratégies d'atténuation différentes pour un scénario donné. Source : (Faist & Junntila, 2017).

#### 4.2.2. Acteurs impliqués

Nous avons identifié que les organisations en charge des différentes démarches - à savoir les développeurs, les propriétaires ou les promoteurs des projets initiaux - sont surtout des laboratoires de recherche, des institutions gouvernementales, des entreprises privées de développement de modèles et outils à destination d'entreprises industrielles et des opérateurs de réseaux. La diversité

des parties prenantes impliquées et des responsables du développement des démarches est une des raisons de la diversité des cadres méthodologiques, des objectifs et des ressources associées.

Certaines entreprises privées travaillent par exemple sur des outils à la croisée de la recherche scientifique et du développement commercial et n'auront pas les mêmes objectifs, contraintes ou opportunités qu'un laboratoire de recherche. On peut ainsi identifier différents objectifs inhérents à ces différents acteurs : la recherche académique, l'amélioration des connaissances et des techniques (avec des objectifs opérationnels plus ou moins directs), la gestion des risques et la fiabilité industrielle, mais aussi des objectifs plus commerciaux pour certaines entreprises spécialisées dans la modélisation de ces systèmes complexes et qui visent à vendre des solutions logicielles génériques (applicables à des systèmes très variés). La Figure 36 ci-dessous tente de situer les différents types d'organisations en fonction des différents types d'objectifs identifiés dans l'étude et la modélisation des phénomènes d'(inter)dépendance et de défaillance en cascade.

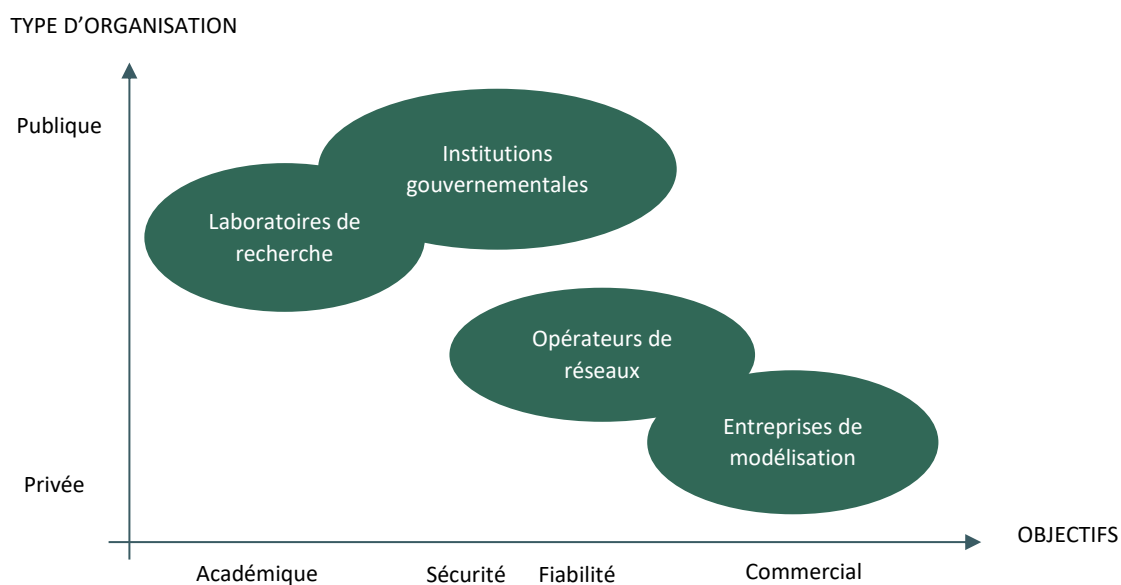


Figure 36 : Positionnement des organisations en charge des démarches étudiées selon leurs objectifs.

Nous pouvons citer d'une part l'initiative nommée « Cross Dependency Initiative - Adapt » développée par XDI Systems (Laker, 2018; NSW Government, 2018). Celle-ci combine la climatologie, l'analyse financière et l'analyse de coûts-bénéfices tout en identifiant les (inter)dépendances entre les infrastructures pour évaluer le risque associé à chaque actif en fonction du risque d'échec et des coûts des dommages et ainsi déterminer les options d'adaptation les plus pertinentes. Cette solution logicielle est destinée à être vendue aux opérateurs ou aux municipalités pour améliorer leur résilience.

D'autre part, nous pouvons citer les travaux de divers projets de recherche universitaires (Lönnermark & Lange, 2016; Ptilakis et al., 2014) qui ont des contraintes moins opérationnelles et qui visent à imaginer et développer de nouvelles façons de modéliser et de simuler ces phénomènes. Logiquement, les solutions commerciales auront des objectifs, des processus de construction et de développement, des architectures et des interfaces avec les utilisateurs très différents des démarches expérimentales mises en œuvre par les laboratoires de recherche car les conditions de création et les objectifs de déploiement sont différents. Il est également observé que les acteurs opérationnels locaux, et notamment les collectivités, sont généralement impliqués au stade du test et de la mise en œuvre

mais très rarement impliquées au stade du développement et du recueil des besoins. Les démarches sont majoritairement initiées par des chercheurs ou des experts, accompagnateurs scientifiques et/ou techniques, et non par les futurs utilisateurs potentiels.

### 4.2.3. Architecture et principe des méthodes utilisées

Les architectures rencontrées parmi les différentes démarches peuvent être très variées. Certaines méthodes sont très formalisées et mathématisées, avec un modèle intégré basé sur des algorithmes sophistiqués ou des théories de logique comme celle proposée pour CIPMA (Lew, 2011). D'autres sont plus informelles dans la manière dont elles modélisent le fonctionnement des réseaux et identifient des scénarios de défaillance critiques en cascade particuliers, telles que la démarche élaborée par Toubin et al. (2014). Nous rencontrons ainsi des méthodes basées sur des tableaux Excel et des bases de données relationnelles, comme l'approche Domino (Robert et al., 2013) dont la base de données est présentée dans la Figure 37.

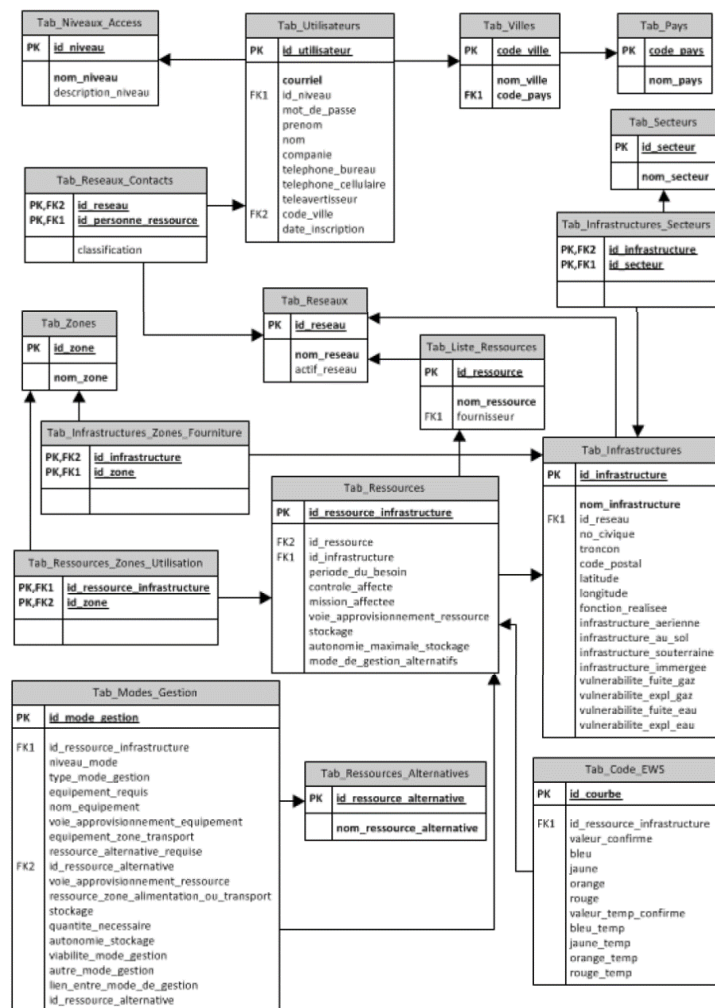


Figure 37 : Structure de la base de données utilisées au sein de Domino. Source : (Pellet, 2009).

D'autres initiatives reposent plutôt sur la compilation de résultats détaillés de différents simulateurs à l'échelle de l'infrastructure ou même des composants comme illustré par la Figure 38 (Rahman et al. 2008). Un outil nommé I2Sim a été développé pour modéliser les (inter)dépendances entre les systèmes d'infrastructures critiques, dans l'objectif de prendre des décisions coordonnées pour un déploiement optimal des ressources et des actions après la survenue de perturbations ou

catastrophes. Un module nommé DR-NEP offre ensuite une plateforme commune pour faire communiquer les différentes parties prenantes utilisant différents langages.

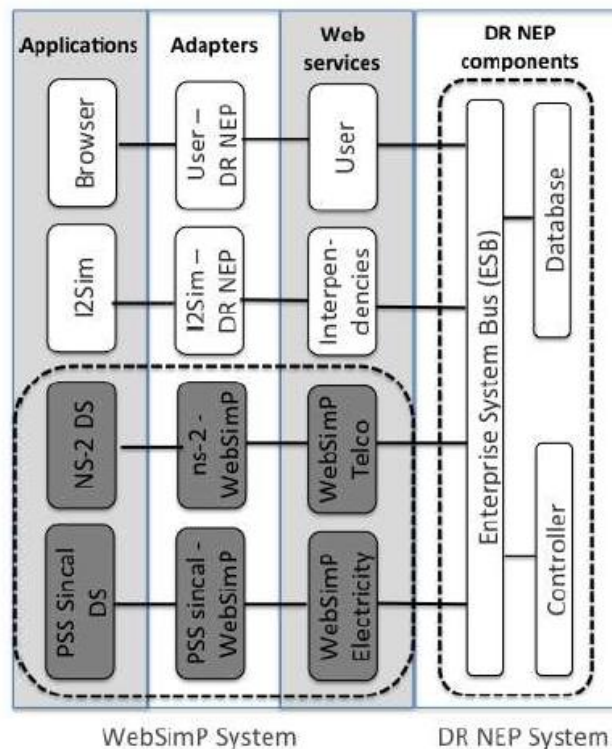


Figure 38 : Illustration du fonctionnement de la démarche DR-NEP basée utilisant l’outil I2Sim ainsi que d’autres simulateurs sectoriels. Source : (Alsubaie et al., 2013).

Cette étude nous a permis de prendre conscience de la place non négligeable occupées par les méthodes empiriques basées sur l’expertise et des données historiques, beaucoup plus faciles à déployer d’un point de vue opérationnel. Les démarches basées sur les réseaux de Pétri ou bayésiens, ou sur des modélisations économiques sont moins représentées par exemple. Sachant que nous supposons que notre échantillon a une certaine représentativité, nous estimons que plusieurs facteurs peuvent expliquer pourquoi certaines techniques sont utilisées plus que d’autres. Notre hypothèse est que des facteurs non scientifiques peuvent également influencer la construction ou le choix de ce type de démarches, comme cela sera discuté par la suite.

Nous notons que ces techniques de modélisation sont combinées et complétées par d’autres provenant de différentes disciplines telles que les simulations de Monte-Carlo, les arbres de décision, les techniques d’analyse et de gestion des risques, la surveillance en temps réel, la simulation temporelle, la modélisation floue, etc. Des simulations « what-if », c’est-à-dire plusieurs simulations parallèles qui utilisent différentes hypothèses (ou scénarios d’actions prises) pour étudier le comportement d’un système complexe, sont utilisées pour aider à la décision dans la moitié des initiatives étudiées. Des outils de représentation tels que les systèmes d’information géographique (SIG) sont également utilisés, ceux-ci étant un élément clé pour la compilation et l’analyse d’informations ainsi que pour la représentation des résultats (Lhomme et al., 2013).

Il est important de souligner qu’une démarche donnée peut combiner plusieurs types et techniques de modélisation. Par exemple, l’outil I2Sim combine une formalisation multi-agents pour des blocs systèmes qui ne peuvent pas être décrits par des équations mathématiques, des formules mathématiques, et les principes du modèle « Input-Output » (Tofani et al., 2017).

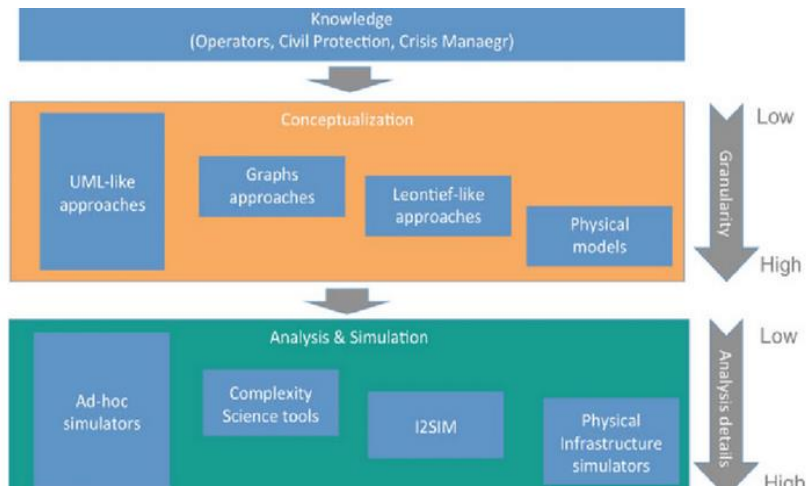


Figure 39 : Principe de fonctionnement d'une démarche complexe, composée de différents modules permettant de passer de la collecte des savoirs des parties prenantes à la simulation des impacts des défaillances en cascade. Source : (Tofani et al., 2017).

L'initiative Predict utilise également plusieurs techniques, notamment les principes des réseaux bayésiens, un raisonnement basé sur des scénarios et la fédération d'outils existants tels que PROCeed, qui utilise entre autres les réseaux de Petri (Klaver et al., 2016).

Il est intéressant de souligner que plusieurs démarches complexes ont choisi de ne pas développer un nouveau formalisme commun à plusieurs réseaux ou types d'infrastructures, mais plutôt de combiner des simulateurs sectoriels spécifiques existants dans un même méta-logiciel (Hopkinson et al., 2003; Panzieri et al., 2004; Rome et al., 2009). Les simulateurs sectoriels sont des outils de simulation qui tentent de reproduire le comportement d'un système ou d'un réseau, par exemple Siemens PSS Sincal ou NETOMAC, PowerWorld Simulator et EPfast pour l'électricité, NS-2 ou OMNET ++ pour les télécommunications, NGfast pour le gaz naturel, OpenTrack pour les chemins de fer, FIRST pour les réseaux routiers, Inforworks ICM pour les systèmes de drainage.

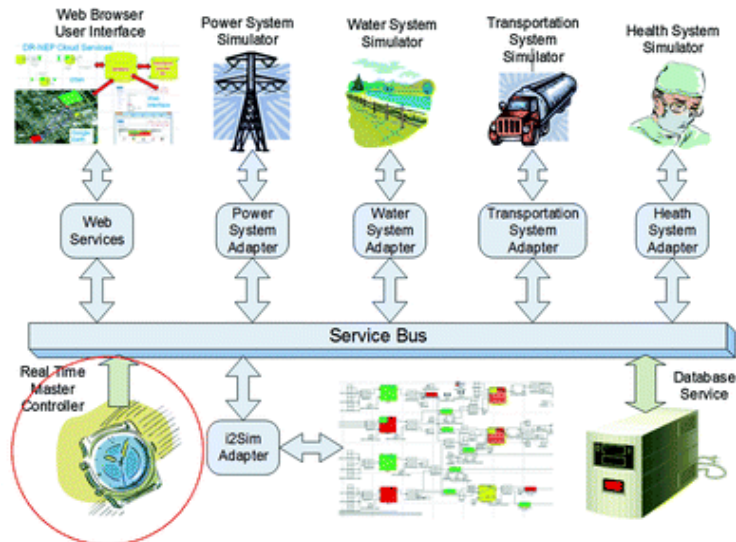


Figure 40 : Couplage de plusieurs simulateurs sectoriels pour la modélisation de certains réseaux et de certains aléas, grâce à des modules de mise en cohérence. Source : (Tofani et al., 2017).

Ce type de démarche combine ensuite les résultats des simulations parallèles pour chaque simulateur. Cette approche, qui utilise des éléments déjà en place ou déjà existants, peut améliorer l'efficacité et la flexibilité des différents simulateurs, tout en réduisant la complexité de la plate-forme de simulation globale.



#### 4.2.4. Objets modélisés

Les objets étudiés diffèrent selon les différentes démarches et peuvent aller d'un réseau urbain unique tel qu'un système de distribution d'eau potable (Piller et al., 2017), aux relations entre deux réseaux spécifiques tels que le trafic urbain et la distribution électrique (Fotouhi et al., 2017), jusqu'à l'ensemble des secteurs urbains (Robert et al., 2013) ou des infrastructures critiques (Bush et al., 2005b).

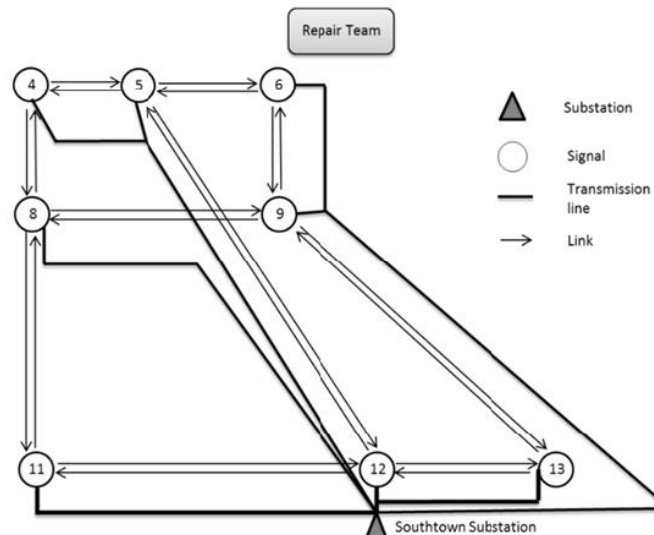


Figure 41 : Modèle simplifié d'un réseau routier et de son alimentation électrique. Source : (Fotouhi et al., 2017).

Ces objets correspondent souvent aux services urbains ou aux réseaux techniques sous-jacents : énergie, transport, télécommunications et eau. Certains services ne s'appuyant pas sur un réseau technique peuvent également être au cœur de certains travaux, tels que l'approvisionnement alimentaire, le secteur bancaire et financier, les secteurs de la santé et de la sécurité. Certaines initiatives considèrent en particulier les bâtiments ou les infrastructures dites critiques, c'est-à-dire les actifs ou éléments d'actifs qui sont indispensables au maintien des fonctions sociétales critiques et le bien-être économique ou social des citoyens (European Council Directive 2008/114/EC of 8 December 2008 on the Identification and Designation of European Critical Infrastructures and the Assessment of the Need to Improve Their Protection, 2008). Les infrastructures critiques regroupent des éléments des différents services urbains mentionnés ci-dessus, mais également d'autres, comme des actifs gouvernementaux par exemple.

Nous réalisons que certains réseaux, considérés critiques ou bien connus et documentés, sont plus étudiés et modélisés que d'autres. C'est particulièrement le cas pour le réseau de distribution d'électricité, notamment en raison de sa position centrale dans le fonctionnement urbain. Les télécommunications, l'approvisionnement en eau potable et le transport des personnes sont également très étudiés. Nous soulignons que ces réseaux font également souvent l'objet de simulateurs sectoriels dédiés (Di Pietro et al., 2017).

#### 4.2.5. Echelles spatiales et niveaux de granularités

Dans le cadre de ces travaux, nous entendons par échelles spatiales les périmètres géographiques correspondant aux zones étudiées dans les différentes démarches. Cet état de l'art nous amène à nous rendre compte que l'échelle spatiale du périmètre considéré est l'un des facteurs déterminants dans l'étude des interactions entre réseaux urbains, infrastructures, acteurs, territoires, etc. Elle a une influence sur les éléments à étudier, la manière de les étudier, les personnes à impliquer, la durée du

processus, mais aussi les niveaux de détail des données d'entrée ou les résultats obtenus à la sortie. Nous pouvons identifier plusieurs échelles distinctes telles que l'agglomération, la ville, le quartier, l'îlot ou même l'infrastructure, qui correspondent à différents niveaux de gouvernance et de problématiques.

Nous définissons la granularité, notion qui sera précisée et discutée dans le chapitre 6, par le niveau de détails de l'analyse, ce qui correspond notamment aux types d'objets étudiés dans la zone d'étude. Cela semble également avoir une influence sur des facteurs tels que la quantité de données nécessaire pour obtenir un résultat pertinent, mais également sur la nature de ces données. Ainsi, certaines sont appliquées à une zone géographique limitée entourant une infrastructure particulière (Lönnermark et al., 2016), un quartier d'une ville (Rome et al., 2009; Toubin, 2014) avec une granularité au niveau infrastructure ou une ville entière avec une granularité au niveau des services (Barreiro et al., 2017; Toubin et al., 2014).

Certaines démarches se révèlent cependant flexibles concernant les niveaux de granularité et les périmètres géographiques considérés. On peut développer l'exemple des travaux menés dans le cadre du projet RESCCUE, où l'outil Hazur a été implémenté à différents niveaux de granularité et sur différents périmètres géographiques, comme illustré dans la Figure 42 (Bocquentin et al, 2020). A Barcelone, l'analyse s'est concentrée à un niveau macroscopique sur tous les réseaux urbains, et sur le réseau d'eau de façon plus fine. A Lisbonne, le travail s'est concentré sur une zone particulièrement critique dans laquelle se trouvent des bassins de captage d'eau, en accordant une importance particulière aux réseaux d'eau et d'énergie à l'échelle de leurs infrastructures. Des travaux basés sur différents scénarios thématiques au niveau de quartiers spécifiques ont été au cœur du travail mené à Bristol, permettant une granularité fine.

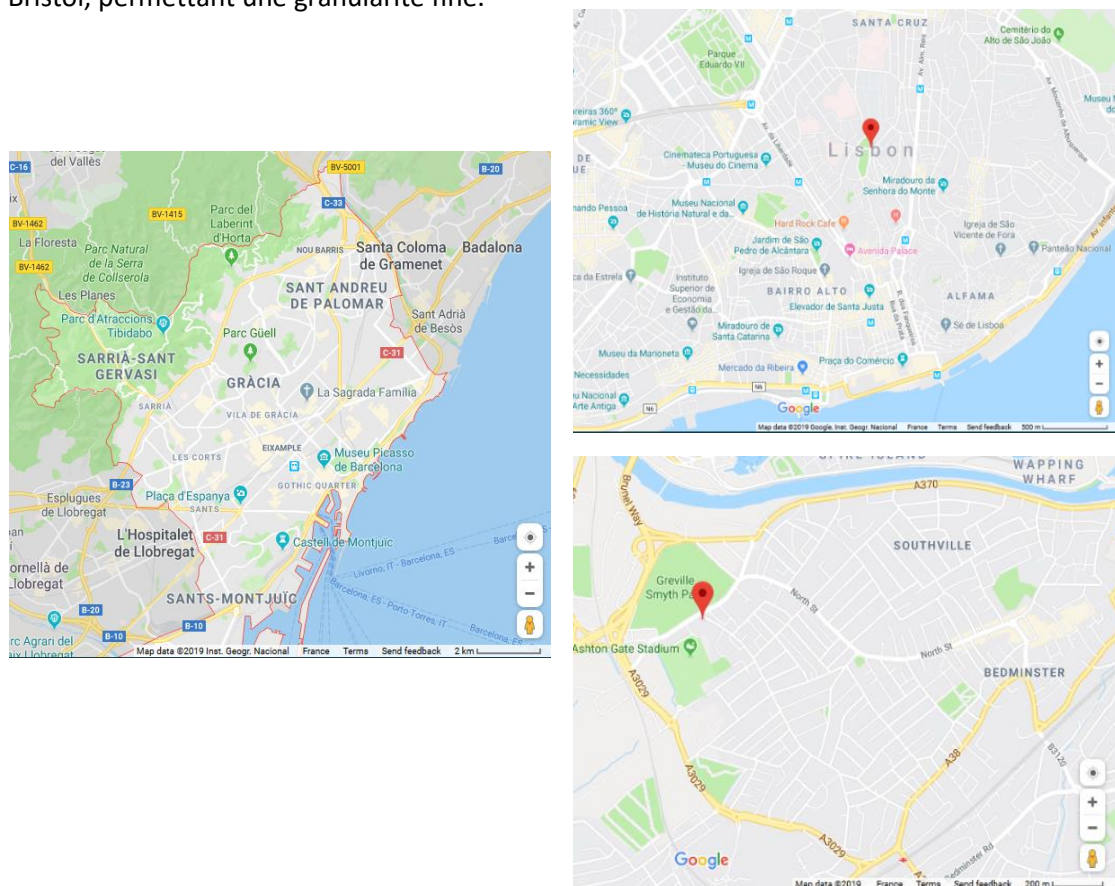


Figure 42 : Les périmètres géographiques considérés pour différentes implémentations de l'outil Hazur dans le projet RESCCUE.

Cette dualité entre granularité et échelle est représentée par la Figure 43 ci-dessous. Les démarches correspondant à un périmètre géographique limité présentent généralement une granularité supérieure si un nombre équivalent d'éléments est pris en compte, et traitent donc des données plus quantitatives.

Nature qualitative des données –  
Echelle spatiale de la zone d'étude

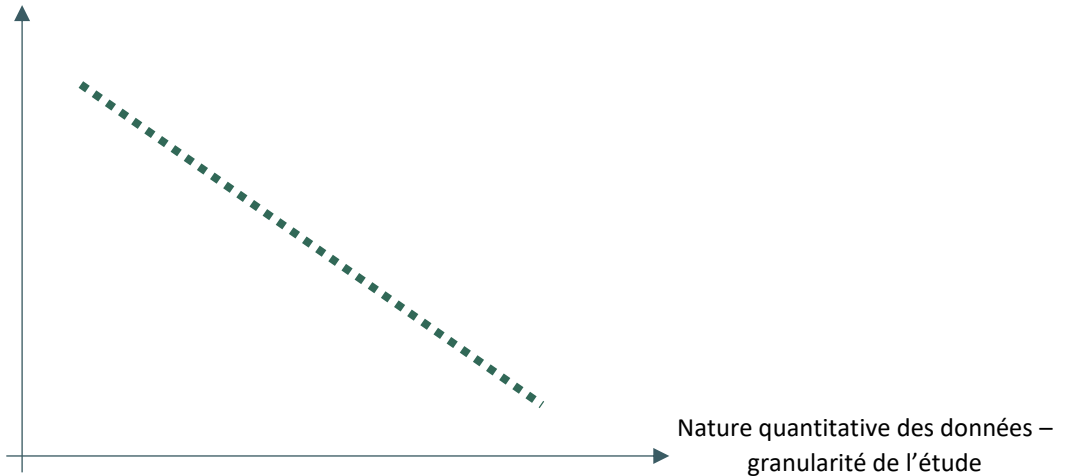


Figure 43 : Comparaison des facteurs d'échelle et de granularité pour les approches étudiées.

#### 4.2.6. Données utilisées en entrée

Les types de données et d'informations nécessaires pour implémenter la méthodologie ou l'outil diffèrent considérablement d'une initiative à l'autre et peuvent aller d'estimations globales des dépendances de service (autonomie, pondération globale des dépendances) présentées dans la Figure 44, de jugements d'experts utilisés par exemple par Tsavdaroglou et al. (2018), de retours des citoyens affectés par certaines défaillances de services recueillis par exemple par Hilly et al. (2018) à des courbes de fragilité (comportement détaillé des composants d'un objet pour chaque aléa et chaque type de vulnérabilité) comme utilisées par Hamden (2017) et Pitilakis et al. (2014), dont la bibliothèque de courbes est présentée dans la Figure 45. Certaines approches s'affranchissent d'ailleurs

|                      |                 | DIAGNOSTIC                                |             |           | EVALUATION                         |                           |   |
|----------------------|-----------------|---|-------------|-----------|------------------------------------|---------------------------|---|
| Ressources utilisées |                 | Préciser (nature, quantité, localisation) | Fournisseur | Autonomie | Délai de remise en service système | Fiabilité de la ressource | Criticité pour le système<br>en situation normale<br>en situation perturbée |
| Internes             | personnel       |   |             |           |                                    |                           |   |
|                      | biens           |   |             |           |                                    |                           |   |
|                      | infrastructures |   |             |           |                                    |                           |   |
|                      | données         |   |             |           |                                    |                           |   |
| ...                  |                 |   |             |           |                                    |                           |   |
| Externes             | matière         |   |             |           |                                    |                           |   |
|                      | infrastructures |   |             |           |                                    |                           |   |
|                      | énergie         |   |             |           |                                    |                           |   |
|                      | eau             |   |             |           |                                    |                           |   |
|                      | réseau TIC      |   |             |           |                                    |                           |   |
| service              |                 |   |             |           |                                    |                           |   |
| ...                  |                 |   |             |           |                                    |                           |   |

Figure 44 : Grille d'évaluation de la dépendance aux différentes ressources pour un système donné. Source : (Toubin, 2014).

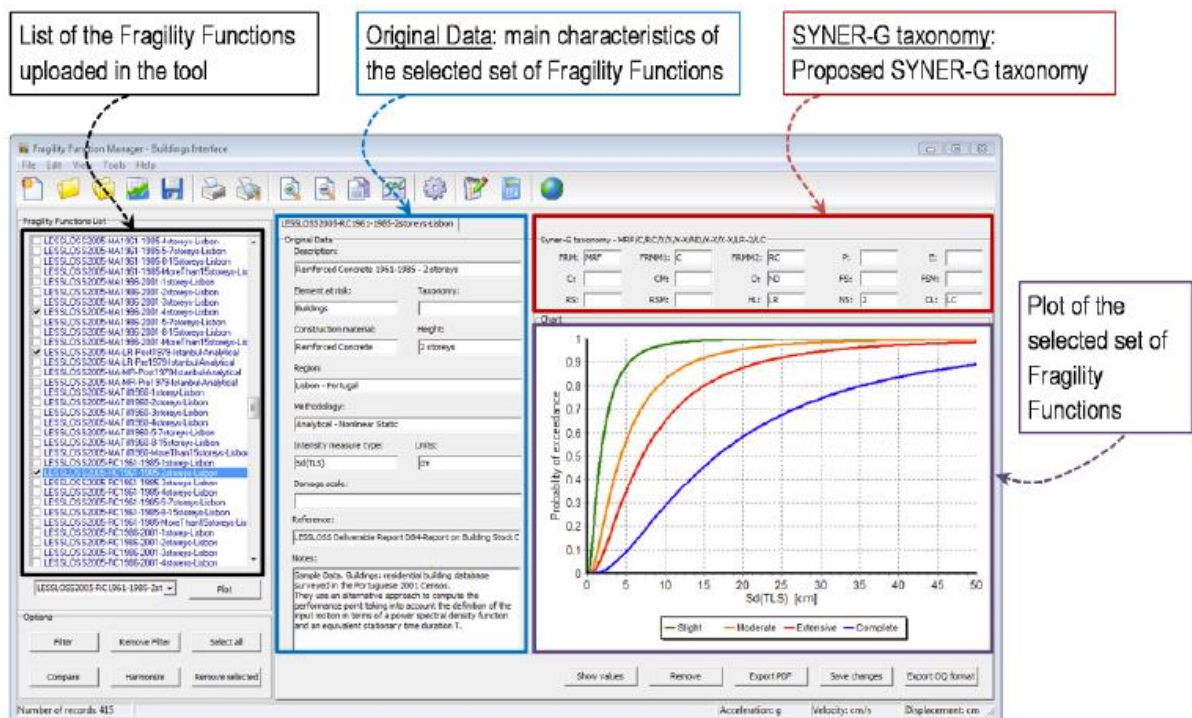


Figure 45 : Bibliothèque de courbes de fragilité construite dans le cadre de l’initiative Syner-G. Source : (Pitilakis et al., 2014).

On observe ainsi que les façons de renseigner les différentes données nécessaires au fonctionnement du modèle diffèrent : tableaux à remplir par les opérateurs, matrices de dépendances, formulaires avec grandeurs quantitatives, importation de cartes ou de listes, courbes de fragilités... Les personnes en charge de ce renseignement peuvent être les développeurs, les utilisateurs, les experts, les opérateurs etc.

Il apparaît que la variable temps n’est pas toujours considérée, et que l’incertitude concernant ces données n’est que très rarement prise en compte. Nous avons tenté de représenter la diversité des données d’entrée utilisées en fonction d’une catégorisation appropriée dans le Tableau 15.

Tableau 15 : Sujets des données d’entrée des démarches étudiées.

| Sujet            | Description   |
|------------------|---|
| Contexte         | Aléas, scénarios climatiques, morphologie du territoire, parties prenantes, etc.  |
| Objets modélisés | Propriétés physiques, données techniques détaillées, données sur les agents, retours intégrés des opérateurs, données brutes des opérateurs, vulnérabilité des objets, équations des opérations, avis d’experts, etc.   |
| Interactions     | Données techniques détaillées, (inter)dépendances économiques et fonctionnelles, règles d’agents, avis d’experts, ressources nécessaires, actions humaines, flux, retours intégrés des opérateurs, données brutes des opérateurs, équations opérationnelles, résultats des simulateurs sectoriels, etc. |
| Conséquences     | Capacités opérationnelles, rapports de retours d’expérience, décisions humaines, retours d’expériences intégrés des opérateurs, éléments de contexte, données des capteurs, résultats des simulateurs sectoriels, avis d’experts, courbes de dommages, estimations de pertes, etc.                      |

Les phénomènes considérés peuvent l'être de façon qualitative ou quantitative. Les liens de dépendances peuvent par exemple être traités seulement à travers leur nature, mais également par des métriques quantifiées. Celles-ci peuvent caractériser les (inter)dépendances et leurs impacts sur les comportements des systèmes touchés, ou quantifier les forces et faiblesses des infrastructures ou de leurs composants (Casalicchio & Galli, 2008).

Certaines démarches, telle que XDI par exemple (Laker, 2018), sont très demandeuses en termes de quantités de donnée d'entrées, et génèrent également de nombreuses données en sortie. La Figure 46 présente ainsi par exemple les coefficients de réactions aux différents aléas qui doivent être renseignés pour chaque matériau. Il apparaît que certaines relèvent plus de la boîte noire et ne proposent pas de relations explicite entre les entrées et sorties, lorsqu'elles sont par exemple codées dans un programme informatique ou lorsqu'elles sont implicites dans un formalisme empirique ou un méta-modèle (Zio, 2018).

| Material                             | Heatwave<br>(Expansion<br>Coefficient<br>– 10 <sup>-6</sup><br>m/mK) | Bushfire<br>(Melting<br>point -<br>°C) | Extreme<br>Wind<br>(Ultimate<br>strength<br>– MPa) | Material<br>Contraction<br>(Poisson's<br>ratio – 10 <sup>-6</sup><br>m/mK) | Riverine<br>Flooding<br>( ) | Coastal<br>Inundation<br>( ) |
|--------------------------------------|--|--|--|--|-----------------------------|------------------------------|
| Brick Veneer                         | 5  | 1800                                   |  | 0.205  |                             |                              |
| Carpet                               |  | 163                                    |  |  |                             |                              |
| Cellulose                            | 130  | 85                                     |  |  |                             |                              |
| Clay Bricks                          |  | 1780                                   |  | 0.205  |                             |                              |
| Colorbond                            |  | 1350                                   | 860  |  |                             |                              |
| Comp. Cement Sheet<br>(not asbestos) |  | 1450                                   | 3.5  | 0.2  |                             |                              |
| Concrete Blocks                      |  | 1000                                   | 3.5  | 0.2  |                             |                              |
| Concrete Panel                       | 13.5   | 1000                                   |  | 0.15   |                             |                              |

Figure 46 : Coefficients de réaction pour différents matériaux selon les aléas. Source : (NSW Government, 2018).

La question de la disponibilité, du format et de la qualité des données est centrale car celles-ci semblent faire souvent défaut. L'obtention des données requises se heurte en effet à plusieurs difficultés, telles que les incertitudes inhérentes (qui s'avèrent nombreuses), les problèmes de confidentialité, les différences de formalisation et de langage entraînées par la multiplicité des acteurs (dont certains sont réticents et doivent être incités (Givens & Busch, 2013a)), la saisie en temps réel, la mise à jour et maintenance nécessaires des bases de données... Ces difficultés seront explorées plus en détail dans le chapitre suivant.

#### 4.2.7. Données obtenues en sortie

Les résultats et les données correspondantes en sortie des différentes méthodologies se présentent sous des formats différents et sont plus ou moins quantifiés. Certaines démarches telles que celles développées par Foglietta (2013) et Panzieri et al. (2004) se concentrent par exemple sur l'analyse de scénarios hypothétiques et l'identification de points critiques, tandis que d'autres se concentrent sur la quantification des impacts potentiels comme le projet CASCEFF (Hassel et al., 2015). Un nombre très limité d'entre elles étudie réellement la manière dont les incertitudes et les imprécisions sont prises en compte (par exemple, en liant des degrés ou des valeurs d'incertitude aux résultats), mais des projets commencent à les intégrer de manière plus concertée dans leurs modèles, tel que le projet Predict (Klaver et al., 2016). Nous avons tenté de représenter la diversité des données de sortie rencontrées, en fonction d'une catégorisation appropriée des résultats pouvant être obtenus dans le Tableau 16.

Tableau 16 : Données de sorties des démarches étudiées.

| Sujet                      | Description   |
|----------------------------|---|
| Visualisation              | Cartes d'impacts statiques / dynamiques, propagation spatiale et / ou temporelle des défaillances, propagation spatiale et / ou temporelle des dommages, graphes ou cartes de dépendances, courbes / matrices de dépendances...   |
| Construction des scénarios | Scénarios de défaillances en cascade, scénarios d'arbres de défaillances, comparaison de scénarios « what-if »...   |
| Quantification des impacts | Evaluation des impacts fonctionnels, changement des capacités de fonctionnement au cours du temps, évaluation quantitative des impacts / des coûts de réparation, courbes de dommages, conséquences des impacts sur la société... |

La Figure 47 présente par exemple l'évolution des dysfonctionnements au sein de différentes infrastructures à la suite de la défaillance d'une ressource nécessaire à leur fonctionnement, tandis que la Figure 48 présente une comparaison des pourcentages de personnes évacuées selon les actions choisies.

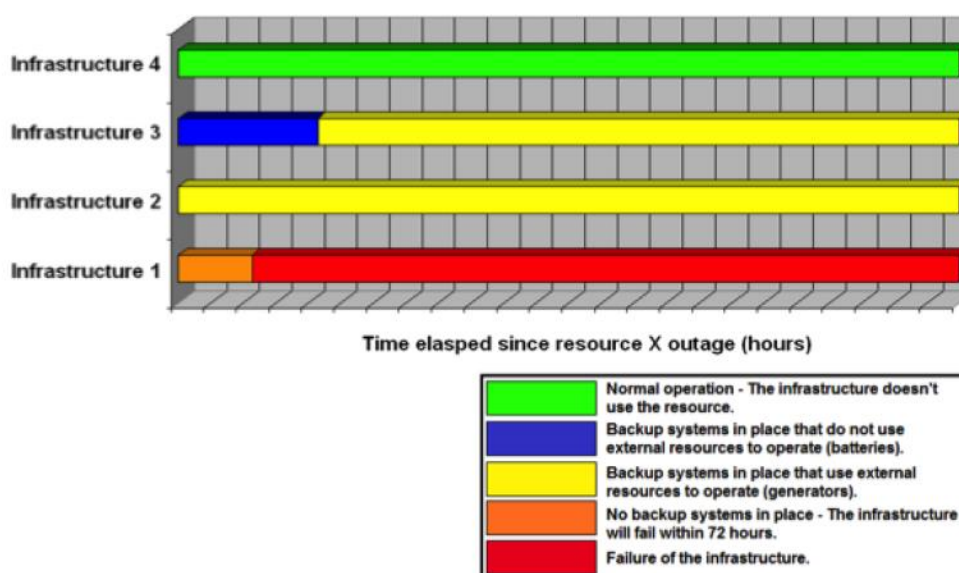


Figure 47 : Représentation temporelle de l'évolution des dysfonctionnements à la suite de la défaillance d'une ressource. Source : (Robert, Morabito, Cloutier, & Hémond, 2012).

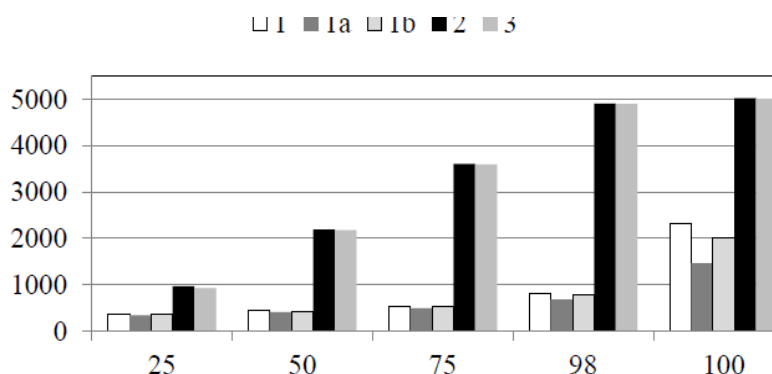


Figure 48 : Comparaison des pourcentages de personnes évacuées selon le temps, pour différents scénarios d'actions simulées. Source : (Bram et al., 2016).

La Figure 49 reprend quant à elle une capture d'écran d'une cartographie d'impact construite pour un scénario de défaillances en cascade.

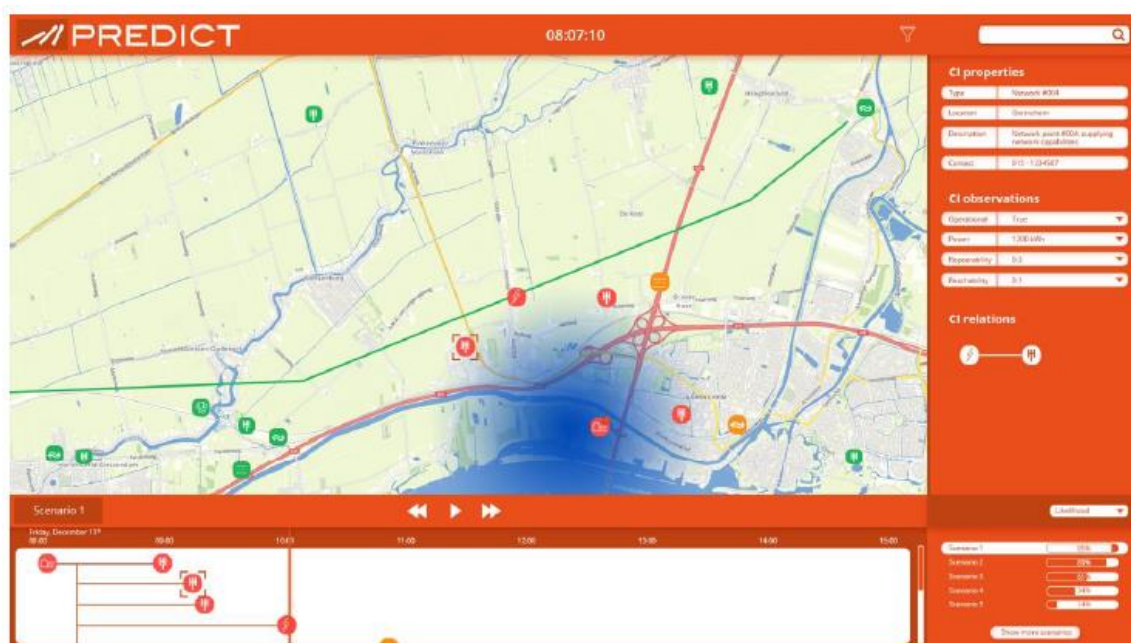


Figure 49 : Capture d'écran de la cartographie du périmètre d'impact construite pour un scénario donné. Source : (Predict Consortium, 2016).

La question des incertitudes relatives aux données sera abordée dans une partie dédiée à celles-ci dans le chapitre suivant.

#### 4.2.8. Aléas pris en compte

Les aléas pris en compte dans les démarches étudiées peuvent avoir une influence sur la manière dont celles-ci sont construites, notamment en ce qui concerne l'aspect temporel, les incertitudes et les échelles spatiales. En effet, les temporalités de certains aléas peuvent aller de l'ordre de la minute (exemple d'une explosion d'une canalisation de gaz) à plusieurs semaines (exemple d'une crue lente), certains scénarios peuvent être connus et analysés (exemple de la crue centennale de la Seine) tandis que d'autres n'ont jamais été imaginés, et les zones touchées peuvent être des quartiers ou des régions entières, voire des pays.

Les aléas pris en compte et étudiés peuvent être des aléas naturels ou des aléas anthropiques. Les risques naturels peuvent être des « événements météorologiques extrêmes » (EWE) génériques, c'est-à-dire des vagues de chaleur, sécheresses, tornades, ouragans, inondations. Toubin et al. (2014) considère un scénario spécifique d'inondation tandis que Pitolakis et al. (2014) examine certains scénarios de tremblements de terre. Les dangers anthropiques peuvent être des accidents industriels ou des attaques terroristes, et sont considérés notamment par Piller et al. (2017).

Ces aléas peuvent se chevaucher et se dérouler simultanément (par exemple, un séisme peut déclencher un tsunami et une submersion marine). Les inondations, et dans une moindre mesure les tremblements de terre, comptent parmi les aléas les plus étudiés par ces démarches (Lhomme et al., 2011a; Pitolakis et al., 2014; Setola et al., 2017).

#### 4.2.9. Discussion

Ce travail d'état de l'art et de caractérisation de différentes démarches d'étude des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade nous a permis de développer certaines réflexions et constats. Tout d'abord, les initiatives existantes sont très diverses : elles n'ont pas les mêmes objectifs, elles ne disposent pas des mêmes moyens et ressources, elles ne sont pas soutenues par les mêmes acteurs, elles ne concernent pas les mêmes objets et les mêmes échelles (et niveaux de granularité), et elles ne fonctionnent pas de la même manière.

Par ailleurs, il semble que les différentes caractéristiques étudiées soient en relation. Par exemple, les architectures sont fortement liées aux données manipulées mais également à la granularité de l'étude. Les relations entre les échelles spatiales et les niveaux de granularité ont également été discutées. Les développeurs et porteurs semblent également influencer les démarches, notamment à travers leurs propres objectifs, moyens et ressources.

La mise en œuvre de méthodologies mathématiques et quantitatives nécessitant de nombreuses données très précises souvent confidentielles - et en évolution rapide -, provenant d'acteurs différents, semble non adéquat pour faire face à des difficultés opérationnelles majeures (Beyer et al., 2010). Les démarches mathématisées sont rarement implémentées de façon opérationnelle sur un territoire donné. C'est-à-dire qu'elles sont pour la plupart utilisées sur un cas d'étude plus ou moins fictif, ou qu'elles incluent des données plus ou moins théoriques et modifiées, notamment par les opérateurs. Cela peut donc entraîner une certaine déconnexion des résultats obtenus par rapport à la réalité.

La présence d'algorithmes mathématiques élaborés va souvent de pair avec une granularité fine de l'étude et avec l'utilisation de données quantitatives détaillées, ces dernières étant difficiles à obtenir. Ces démarches nécessitent un temps de mise en place long et une démarche d'inclusion des acteurs assez laborieuse, elles sont implémentées sur des zones géographiques réduites.

A l'inverse, les démarches privilégiant une mise en place rapide et relativement aisée - notamment au niveau du processus d'implication des acteurs et de l'obtention des données nécessaires pour faire tourner le logiciel - utilisent souvent des données assez qualitatives. Elles permettent alors d'obtenir des résultats plus qualitatifs mais peuvent se permettre d'avoir une zone d'étude d'implémentation plus élargie.

Cette recherche ne prétend pas être exhaustive. Certaines des méthodologies étudiées étaient encore en cours de développement au moment de l'état de l'art et donc sujettes à modification. Cette non-exhaustivité est l'une des raisons pour lesquelles les analyses restent qualitatives et non quantitatives. En outre, il a fallu parfois interpréter les informations recueillies pour en déduire l'utilisation de certaines techniques de modélisation. Les développements récents ou futurs peuvent également modifier le paysage des démarches visant l'étude des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade.

Cette analyse descriptive ne peut avoir l'ambition d'aider les décideurs potentiels de ce type de démarche à faire un choix éclairé, et nous devons poursuivre ce travail dans les prochains chapitres. C'est pourquoi la suite de chapitre s'intéresse aux typologies, et le chapitre suivant à la mise en œuvre et aux conditions de réussite opérationnelle.

Ce travail de caractérisation des démarches peut cependant potentiellement permettre aux non-spécialistes d'identifier et de mieux cerner les enjeux de l'étude des (inter)dépendances et des défaillances en cascade entre les réseaux urbains et leurs infrastructures.



### 4.3. LES TAXONOMIES EXISTANTES DANS LA LITTÉRATURE

Face à cette diversité et cette abondance, certaines études ont cherché à classer et catégoriser les initiatives rencontrées. Rinaldi et al. (2001) ont par exemple identifié quatre catégories de modèles : ceux basés sur la physique, ceux basés sur l'analyse des nœuds, ceux basés sur l'analyse des agents, et ceux basés sur l'analyse des flux et des stocks. Zio (2018) a, quant à lui, identifié quatre types de méthodes centrées sur les systèmes complexes, leurs interconnexions et leurs interactions selon différentes perspectives :

- La méthode structurelle et topologique, qui vise à décrire la connectivité d'un système complexe.
- La méthode logique, qui cherche à capturer la logique du fonctionnement ou dysfonctionnement d'un système complexe.
- La méthode phénoménologique et fonctionnelle, qui tend à rendre compte de la dynamique des opérations interdépendantes entre les composants d'un système complexe et l'environnement.
- La méthode des flux, dont l'objectif est de décrire la physique du fonctionnement du système.

Setola & Theocharidou (2017) ont de leur côté défini une taxinomie des approches de modélisation des dépendances selon trois catégories, schématisées dans la Figure 50 :

- L'approche holistique, qui utilise des modèles simplifiés capables de fournir, avec des approximations, des informations qualitatives sur ces phénomènes, et suppose notamment que chaque infrastructure peut être modélisée comme une entité unique.
- L'approche topologique (ou approche réseaux), qui suppose quant à elle qu'une infrastructure est composée d'un ensemble d'éléments similaires représentés sous forme de nœuds sur un graphe, tandis que les dépendances sont représentées sous forme de liens entre les différents nœuds des réseaux.
- L'approche basée sur la simulation, qui vise à identifier les dépendances émergeant du comportement des différents composants, et elle est généralement quantitative et axée sur l'exploitation.

Ces taxinomies varient dans leur façon de considérer les démarches. Celles de Rinaldi et al. (2001) et de Zio (2018) s'intéressent aux propriétés des réseaux qui sont modélisées, tandis que celle de Setola et Theocharidou (2017) s'intéresse à la façon dont les modèles considèrent les systèmes et sous-systèmes qui composent les réseaux modélisés. Cette dernière taxonomie, dont les principes sont illustrés par la Figure 50, positionne alors les trois approches de modélisation identifiées selon les domaines d'application (stratégique jusqu'à opérationnel), l'effort d'implémentation (faible jusqu'à élevé), et la difficulté de l'élicitation des informations nécessaires au renseignement (facile jusqu'à complexe).

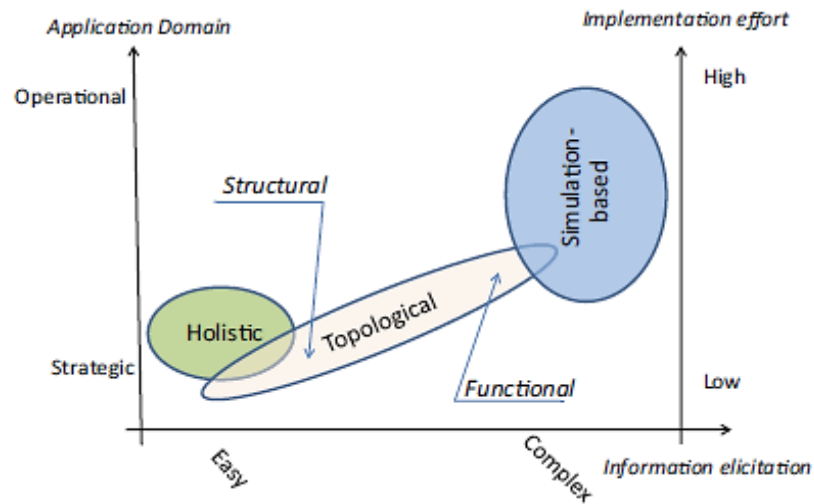


Figure 50 : Taxinomie des approches de modélisation des dépendances. Source: (Setola, 2010).

Une classification intéressante semble être celle proposée par Ouyang (2014). Celle-ci s'intéresse aux méthodes de modélisation des systèmes employées et recense ainsi les approches empiriques, les approches basées sur les agents, les approches basées sur la dynamique des systèmes, les approches basées sur les théories économiques (entrée-sortie, équilibre général calculable), les approches basées sur les réseaux (topologie ou flux), et les autres non catégorisables (HHM, HLA etc.). Cette classification semble donc plus détaillée, moins subjective et plus exhaustive.

| Approach type         | Sub-approach                                   |
|-----------------------|--|
| Empirical             |  |
| Agent-based           |  |
| SD based              |  |
| Economic theory based | Input output<br>Computable general equilibrium |
| Network based         | Topology-based method<br>Flow-based method     |
| Others                | HHM<br>HLA based<br>PN<br>DCST<br>BN           |

Figure 51 : Typologie des approches proposée par Ouyang (2014). Source : (Ouyang, 2014).

Nous avons tenté d'aller un peu plus loin dans l'analyse et de classer dans le Tableau 17 à la page suivante différents types de modélisation rencontrés mais non référencés dans cette typologie. Ce tableau s'appuie donc sur la classification d'Ouyang (2014) et la complète avec les approches rencontrées lors de l'état de l'art. Les catégories reprises d'Ouyang sont en italiques.

Tableau 17 : Récapitulatif des types de modélisation et techniques recensées.

| Type de modélisation           | Technique                                      | Description  |
|--------------------------------|--|--|
| <i>Modélisation empirique</i>  | Matrices de cotation à double entrées          | Modélisation des relations entre objets avec des matrices, dont les liaisons répondent à des critères de notation.   |
|                                | Base de données relationnelle                  | Organisation des données techniques sur les objets (portant notamment sur les liens entre eux) au sein de tables décrites de façon formelle, qui peuvent être évaluées ou réassemblées de différentes façons sans avoir à réorganiser les tables.  |
|                                | Courbes de vulnérabilité ou de fragilité       | Modélisation de la probabilité de défaillances selon l'intensité de l'aléa, ou les dommages estimés selon l'intensité de l'aléa (par exemple la hauteur d'eau pour une inondation).  |
|                                | Modèles fonctionnels                           | Modélisation simple des dépendances fonctionnelles, à différentes granularités, et sous diverses formes (tableaux, matrices, arbres...).   |
| <i>Systèmes Multi-Agents</i>   |  | Modélisation informatique de multiples agents (physiques ou virtuels) interagissant au sein d'un environnement et selon des règles.  |
| <i>Dynamique des Systèmes</i>  |  | Modélisation des comportements non linéaires des systèmes complexes selon le temps avec des stocks, des flux, des boucles, des délais temporels... Mesure du comportement dynamique du système, avec des équations différentielles par exemple. Utilisation de diagrammes de boucle de causalité et de stocks-flux pour modéliser les dépendances. |
| <i>Modélisation économique</i> | <i>Modèle "Inoperability Input-Output"</i>     | Modélisation dérivée du modèle de Leontief, où les liens de dépendances entre secteurs économiques deviennent des liens de dépendances entre infrastructures pour l'analyse des perturbations et des impacts de ceux-ci en termes d'inopérabilité.   |
|                                | <i>Modèle "Computable-General-Equilibrium"</i> | Modèle utilisant des données économiques réelles pour estimer la réaction aux changements politiques, technologiques ou d'autres facteurs externes (ici des aléas ou défaillances). Il est basé sur des équations décrivant les variables du modèle et une base de données correspondante.   |
| <i>Théorie des Réseaux</i>     | Théorie des graphes                            | Modélisation basée sur l'étude des graphes en tant que structures mathématiques utilisées pour modéliser les relations entre des objets (avec des nœuds, des sommets, des arcs, des arêtes...).  |
|                                | Réseaux Bayésiens                              | Modélisation graphique probabiliste représentant un ensemble de variables aléatoires (nœuds) et leurs dépendances conditionnelles (arêtes) via un graphe acyclique dirigé.   |
|                                | Réseaux de Pétri                               | Graphes bipartis dirigés dans lesquels les nœuds représentent des transitions (événements qui peuvent se produire) et des places (conditions pour qu'ils se produisent) contenant des jetons (ressources disponibles). Les arcs dirigés ou flèches décrivent quant à eux les liens entre une paire place - transition.                             |
| <i>Autres</i>                  |  | Quelques démarches utilisent des méthodes ou techniques spécifiques, ou venant d'autres disciplines.   |

En se basant sur l'étude de ces différentes classifications, nous proposons ici quelques observations qui nous semblent pertinentes.

On réalise tout d'abord que les classifications proposées jusque-là sont variées mais qu'elles partagent une caractéristique principale : elles reposent quasiment uniquement sur l'architecture de modélisation utilisée. Certaines semblent se chevaucher, même si les termes utilisés et les méthodes citées diffèrent en fonction du profil des personnes qui les ont construites notamment. La classification proposée par Setola & Theocharidou (2017) s'intéresse cependant à des facteurs autres que les seules techniques de modélisation, en faisant notamment référence à la complexité, aux approximations, au mode de décomposition des systèmes, etc. Deuxièmement, elles ne prennent pas en compte des aspects plus opérationnels liés à la mise en œuvre des démarches. Enfin, leur architecture est souvent complexe et composée de plusieurs techniques de modélisation, elles-mêmes assemblées de différentes manières.

C'est pour ces différentes raisons que nous avons souhaité étudier de manière plus systémique et globale les différentes initiatives existantes, dans le but de proposer une typologie basée sur des caractéristiques plus opérationnelles. En particulier, l'analyse des processus de mise en œuvre semble très importante pour comprendre ces initiatives, en complément des aspects étudiés au chapitre 4.

L'échantillon voulu représentatif d'initiatives visant l'identification et la modélisation des (inter)dépendances et des défaillances en cascade au sein des réseaux urbains et de leurs infrastructures a été cette fois-ci analysé en examinant non seulement les types de modélisation et leurs articulations, mais également des caractéristiques plus opérationnelles. Cet échantillon est repris dans le Tableau 18, qui présente l'échantillon selon les techniques de modélisation identifiées en leur sein. L'objectif est ainsi d'identifier une typologie plus systémique de ces démarches, afin de pouvoir constituer une seconde étape d'un processus d'aide à la sélection ou au développement d'une approche adaptée à un contexte donné.

Les types de modélisation présentés dans le Tableau 17 sont repris dans les colonnes du Tableau 18 sous les abréviations suivantes :

- EMP= Empirique
  - MF= Modèle fonctionnel
  - MC= Matrice de cotation
  - BDD= Base de données
  - CVF= Courbe de fragilité / vulnérabilité
- SMA= Système multi-agents
- DS= Dynamique des systèmes
- ECO= Economique
  - IO= Input-Output
- RES= Réseaux
  - TG= Théorie des graphes
  - RB= Réseaux bayésiens
  - RP= Réseaux de Pétri
- A= Autre.

Tableau 18 : Présentation de l'échantillon des références utilisées, catégorisées selon les techniques de modélisation.

| Références                                       | EMP |    |     |     | SMA | DS | ECO | RES |    |    | A |
|--|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|----|----|---|
|  | MF  | MC | BDD | CVF |     |    | IO  | TG  | RB | RP |   |
| (Apostolakis & Lemon, 2005)                      | X   |    |     |     |     |    |     | X   |    |    |   |
| (Bernard & Piller, 2017)                         | X?  |    | X   |     |     | X? |     |     |    |    | X |
| (Beyer et al., 2010; Rome et al., 2009)          |     |    |     |     |     |    |     |     |    |    | X |
| (Bush et al., 2005a; Bush et al., 2005b)         |     |    | X   |     | X   | X  | X?  |     |    |    | X |
| (Duflos et al., 2007)                            |     |    |     |     |     |    |     |     |    |    | X |
| (Hassel et al., 2015; Lange et al., 2015)        | X   | X  | X   | X?  |     |    |     |     |    |    |   |
| (Foglietta, 2013; Kyriakides & Polycarpou, 2014) |     | X  | X   |     | X   |    |     |     |    |    | X |
| (Barreiro et al., 2017; Fontanals et al., 2014)  | X   | X  | X   |     |     |    |     |     |    |    |   |
| (Hilly et al., 2018; Velasco et al., 2018)       | X   | X  | X   | X   |     |    |     | X   |    |    | X |
| (Schlobinski, 2015; Zuccarro, 2015)              | X   |    | X   | X   |     |    |     |     |    |    | X |
| (Fotouhi et al., 2017)                           | X   |    | X   |     |     | X  | X?  | X   |    |    |   |
| (Gorbil & Gelenbe, 2009)                         |     |    |     |     | X   |    |     |     |    |    | X |
| (Gursesli & Desrochers, 2003)                    |     | X  |     |     |     |    |     |     |    | X  |   |
| (Haimes et al., 2005)                            |     |    |     |     |     |    | X   |     |    |    |   |
| (Hilly et al., 2018)                             | X   |    | X   |     |     |    |     | X   |    |    | X |
| (Hopkinson et al., 2003)                         |     |    | X?  |     | X   |    |     |     |    |    | X |
| (Johansson & Hassel, 2010)                       | X   |    |     |     |     |    |     | X   |    |    |   |
| (Klaver et al., 2016)                            | X   |    | X   |     |     | X  |     |     | X  |    |   |
| (Laker, 2018; NSW Government, 2018)              | X   |    | X   | X   |     |    | X?  |     |    |    |   |
| (Lew, 2011; Stapelberg, 2008)                    | X   |    | X   |     |     | X  | X?  |     |    | X  |   |
| (Lhomme et al., 2011a)                           | X   |    | X   | X   |     |    |     | X   |    |    |   |
| (Marti, 2014; Wang, 2013)                        |     |    | X   |     | X   | X  |     |     |    |    | X |
| (Palumbo et al., 2016; Zuccaro et al., 2018)     | X   | X? | X   |     | X   | X  |     | X   |    |    | X |
| (Portante et al., 2016)                          | X   |    | X   | X   |     |    |     |     |    |    | X |
| (Pitilakis et al., 2014; Pitilakis, n.d.)        | X   |    | X   | X   |     |    |     |     |    |    |   |
| (Robert et al., 2013)                            | X   |    | X   |     |     |    |     |     |    |    |   |
| (Rozelet et al., 2008)                           |     |    |     |     |     |    |     | X   |    |    | X |
| (van Ruiten et al., 2016)                        | X   |    | X   |     |     |    |     |     |    |    |   |
| (Panzieri et al., 2004; Setola et al., 2017)     |     |    |     |     | X   | X  |     |     |    | X  |   |
| (Toubin et al., 2014)                            | X   | X  | X   |     |     |    |     |     |    |    |   |
| (Tsavdaroglou et al., 2018)                      | X   |    | X   |     |     |    |     | X   |    |    |   |
| (Grangeat, 2017)                                 |     |    | X   | X   |     |    |     | X   |    |    | X |

Légende : EMP= Empirique, MF= Modèle fonctionnel, MC= Matrice de cotation, BDD= Base de données, CVF= Courbe de fragilité / vulnérabilité, SMA= Système multi-agents, DS= Dynamique des systèmes, ECO= Economique, IO= Input-Output, RES= Réseaux, TG= Théorie des graphes, RB= Réseaux bayésiens, RP= Réseaux de Pétri, A= Autre.

## 4.4. PROPOSITION D'UNE TYPOLOGIE BASEE SUR LES PRINCIPES DESCENDANT ET ASCENDANT

Le recensement et l'analyse de ces différentes démarches nous ont également permis de construire des réflexions plus approfondies. Nous avons ainsi pu constater l'influence non négligeable des processus de construction et de développement sur l'architecture et l'utilisation ultime de l'application. En effet, il semble exister une corrélation entre la manière dont la démarche est construite et son objectif final, ainsi que les autres caractéristiques étudiées plus haut.

Nous avons donc travaillé sur une typologie simplifiée des processus de construction utilisés, basée notamment sur les principes d'analyse descendante et ascendante (ou « top-down » et « bottom-up »), que nous présentons ci-dessous.

### 4.4.1. Les paradigmes descendant et ascendant

La distinction entre les paradigmes «ascendant» et «descendant» s'appuie notamment sur des recherches portant sur l'élaboration d'indicateurs de durabilité à des échelles locales synthétisées dans la Figure 52 (Reed et al., 2006). La signification précise que nous attribuons aux termes d'ascendant, descendante et fédérateur dans notre contexte sera explicité plus bas lors de la présentation des différentes catégories.

| Methodological paradigm | Step 1: establish context  | Step 2: establish sustainability goals and strategies  | Step 3: identify, evaluate and select indicators   | Step 4: collect data to monitor progress  |
|-------------------------|--|--|--|---|
| Top-down                | Typically land use or environmental system boundaries define the context in which indicators are developed, such as a watershed or agricultural system | Natural scientists identify key ecological conditions that they feel must be maintained to ensure system integrity | Based on expert knowledge, researchers identify indicators that are widely accepted in the scientific community and select the most appropriate indicators using a list of pre-set evaluation criteria | Indicators are used by experts to collect quantitative data which they analyse to monitor environmental change  |
| Bottom-up               | Context is established through local community consultation that identifies strengths, weaknesses, opportunities and threats for specific systems      | Multi-stakeholder processes identify sometimes competing visions, end-state goals and scenarios for sustainability | Communities identify potential indicators, evaluate them against their own (potentially weighted) criteria and select indicators they can use  | Indicators are used by communities to collect quantitative or qualitative data that they can analyse to monitor progress towards their sustainability goals |

Figure 52 : Les paradigmes descendant et ascendant identifiés pour le développement d'indicateurs de durabilité aux échelles locales. Source : (Reed et al., 2006).

Pour Petit & Verner (2016), les approches descendantes pour l'évaluation des (inter)dépendances d'infrastructures critiques - plus utilisées en ingénierie de la fiabilité - analysent un système dans son intégralité, puis se concentrent sur ses composants. Tandis que les approches ascendantes - plus utilisées dans l'ingénierie de la sécurité - analysent les composants du système individuellement, puis s'appuient sur cette analyse pour décrire le système dans son ensemble.

Ces principes sont synthétisés dans le Tableau 19 ci-dessous, et servent de base à nos réflexions concernant les démarches d'analyse et de modélisation des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade au sein des réseaux techniques urbains et de leurs infrastructures (Bocquentin et al., 2018).

Tableau 19 : Comparaison des approches ascendante et descendante telles que définies par (Petit & Verner, 2016). Source : adapté et traduit de (Petit & Verner, 2016).

| Approche ascendante  | Approche descendante  |
|--|---|
| Décentralisée  | Centralisée   |
| Recueil de données au niveau des composants                    | Recueil de données au niveau du système                         |
| Basée sur les conditions et les opérations réelles             | Souvent basée sur des modèles et de larges ensembles de données |
| Identifie les (inter)dépendances au niveau des infrastructures | Identifie les (inter)dépendances au niveau des systèmes         |
| Part du spécifique vers le global                              | Part du global vers la spécifique                               |

#### 4.4.2. Proposition d'une typologie

L'approche que nous qualifions de « descendante » détaille le fonctionnement des composants d'un système de manière analytique et théorique, à l'aide d'une hiérarchie descendante. Elle regroupe des démarches complexes basées principalement sur des modèles théoriques de certains réseaux techniques spécifiques ou des modèles de dommages économiques par exemple, qui peuvent ensuite être adaptés au contexte de l'étude. Celles-ci utilisent fréquemment une démarche unifiée et simplifiée pour modéliser le fonctionnement de différents réseaux et infrastructures et leurs (inter) dépendances, et définissent des hypothèses simplificatrices. Par conséquent, ces démarches sont souvent très spécifiques et adaptées à un type de réseau ou d'infrastructure particulier. Ces principes sont synthétisés par la Figure 53. Nous notons que cette approche rassemble des démarches très variées basées sur une combinaison de diverses théories telles que la théorie des graphes, les chaînes de Markov, les réseaux de neurones ou réseaux de Pétri, les systèmes multi-agents, les modèles économiques, etc. Les résultats obtenus sont généralement quantitatifs. Nous précisons que la phase de validation et de vérification sont des étapes cruciales pour le développement et la mise en œuvre d'une démarche de modélisation et de simulation. La vérification du modèle permet de s'assurer que le modèle (informatisé ou non) et sa mise en œuvre sont corrects tandis que la validation permet de s'assurer qu'un modèle donne des résultats conformes, dans une plage de précision compatible avec l'application envisagée du modèle (Sargent, 2010). Ces démarches permettent ainsi d'asseoir la crédibilité du modèle et à développer chez les utilisateurs potentiels une certaine confiance dans l'utilisation du modèle et des résultats obtenus.

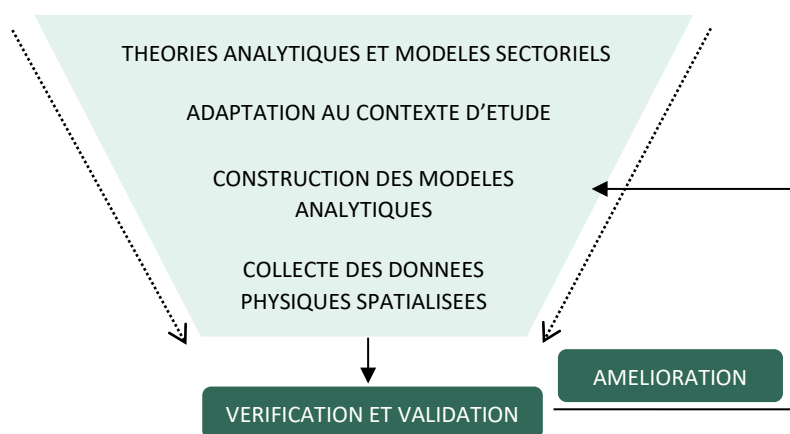


Figure 53 : Construction d'une approche descendante.

Par exemple, l'initiative CIPMA développée par le gouvernement australien depuis 2004 rassemble des décideurs et des gestionnaires au sein d'un réseau de confiance appelé TISN pour échanger des données dans un environnement sécurisé et structuré (Lew, 2011; Stapelberg, 2008). Ces informations sont ensuite traitées de manière complexe par différentes applications et modèles (bases de données, réseaux de Pétri, systèmes multi-agents), pour notamment identifier les vulnérabilités, les (inter)dépendances, les scénarios de défaillances en cascade critiques, les coûts socio-économiques, etc. comme illustré dans la Figure 54. Les résultats peuvent être utilisés dans les études stratégiques et les analyses de risque rapides, qui mettent fortement l'accent sur le retour sur investissement des gestionnaires, d'où les analyses économiques approfondies. Les informations sur les résultats obtenus et l'organisation des modèles sont relativement rares et limitées, mais cet outil est utilisé à des fins opérationnelles en Australie dans différents contextes. Nous notons que cette démarche se concentre sur les causes et pas uniquement sur les impacts potentiels, ainsi que sur les nœuds critiques. Il convient également de noter que le contexte australien est très spécifique en ce qui concerne la manière dont les infrastructures et les réseaux essentiels sont organisés avec une grande dispersion, des distances énormes, un faible niveau de redondance et un petit nombre de parties prenantes.

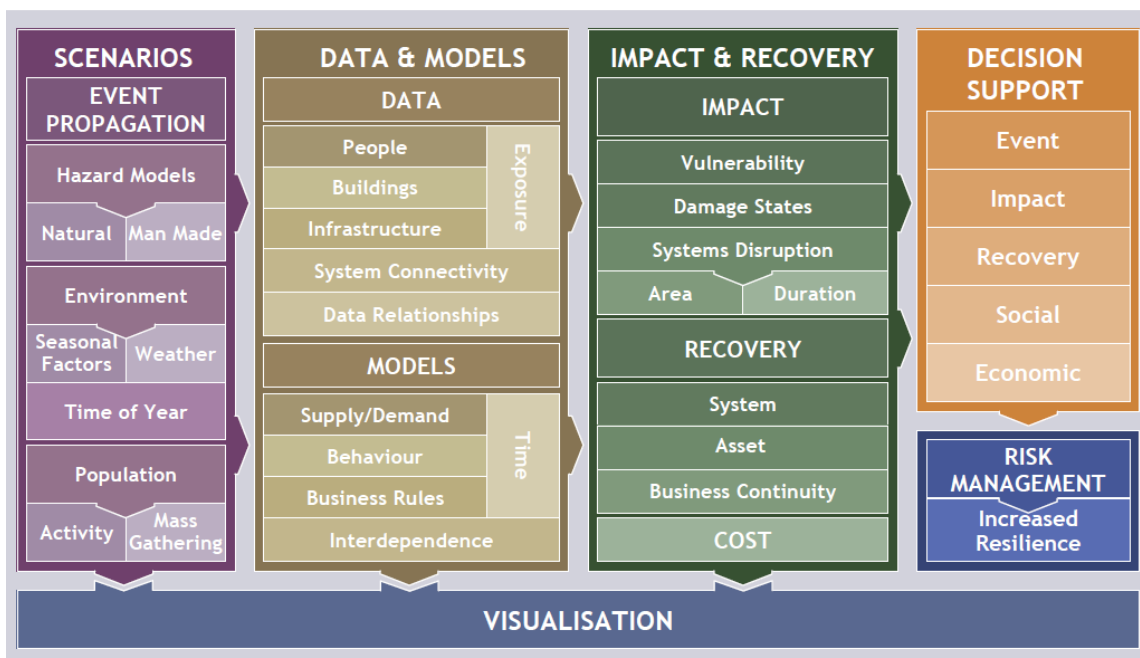


Figure 54 : Architecture de l'approche CIPMA. Source : (Scott, 2007)

Le projet SNOWBALL (Palumbo et al., 2016) peut également être considéré comme relevant de l'approche « descendante ». Ses objectifs principaux étaient de comprendre, de mieux prévoir et de simuler les effets en cascade d'une crise, d'intégrer la réponse et le comportement des populations dans les outils de simulation et de fournir un appui à la décision aux autorités publiques et aux décideurs politiques. Un prototype, étudiant les réseaux de télécommunications, l'eau et l'électricité, a été développé avec différents modules, dont celui appelé CAESAR : "Simulation d'effets en cascade dans les zones de résilience accrue" pour l'analyse des pannes en cascade nécessitant un minimum de données. Il utilise des modèles de défaillance dus à des dépendances géographiques en fonction des rayons d'influence. La méthode est basée sur des arbres d'événements, avec des probabilités conditionnelles, définies pour le passage entre deux événements par des bases de données, ainsi que sur des jugements d'experts au niveau local.



Ce que nous appelons l'approche « ascendante » inclut quant à elle des démarches empiriques qui élaborent une théorie basée sur différentes expériences avant de la consolider progressivement, avec la coopération d'acteurs de terrain, de gestionnaires et d'experts. Cette approche repose sur un cadre systémique partagé qui s'appuie sur l'expertise et l'expérience des parties prenantes et sur une simplification relative de la modélisation des (inter) dépendances fonctionnelles, souvent en l'absence de réelle modélisation des défaillances en cascade. Les échanges d'informations et de savoir-faire sont encouragés et facilités tout au long de la phase de mise en œuvre de la démarche. Ces principes sont synthétisés dans la Figure 55. La plupart des démarches correspondantes sont relativement simples à mettre en place et peuvent être transposées. Cependant, il convient de noter que les résultats de ce type d'approche sont généralement non-spatialisés, et que les défaillances en cascade sont réduites à quelques variables (telles que le temps de coupure) sans réelle simulation du phénomène.

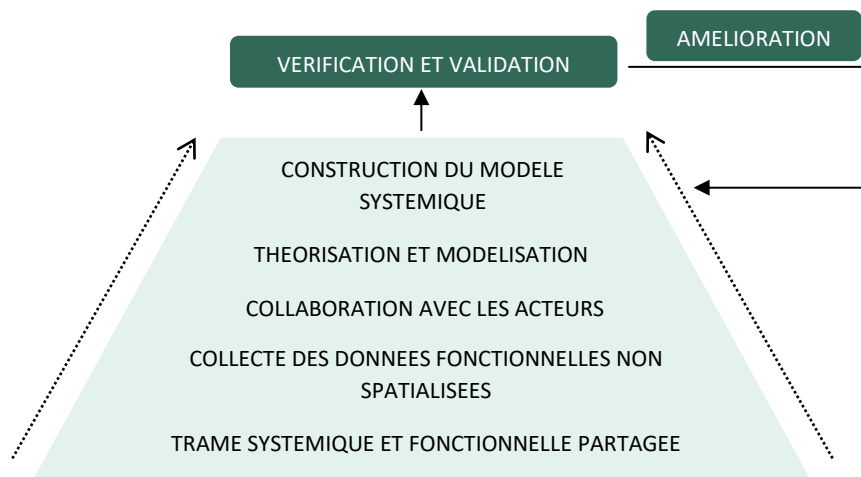


Figure 55 : Construction d'une approche ascendante.

À titre d'exemple, citons le logiciel HAZUR (Barreiro et al., 2017; Chelleri & Fontanals, 2014) développé par la start-up espagnole Opticits à la suite de recherches sur le sujet (Robert, 2004; Toubin et al., 2014). L'outil traite l'identification, la modélisation et la visualisation des (inter)dépendances et des impacts associés aux cascades à la suite d'un événement. Cet outil opérationnel collaboratif se concentre sur deux niveaux d'analyse : les services urbains et leurs infrastructures, d'un point de vue fonctionnel et dans une moindre mesure géographique. Nous notons l'absence de critères de vraisemblance. Cependant, la criticité des services et leur autonomie sont incluses et compilées. Cette approche nécessite l'implication engagée et à long terme des décideurs, des gestionnaires et des parties prenantes des différents services, mais peut donner des résultats intéressants et pertinents pour une gestion urbaine plus systémique. Ceux-ci peuvent être partagés sous une forme facilement compréhensible, sous forme de carte ou de matrice.

initial matrix

|                          | Electricity Distribution | Fuel Distribution | Health Services | Roads      | Schools | Sewage     | Social Services | Water Distribution |
|--------------------------|--------------------------|-------------------|-----------------|------------|---------|------------|-----------------|--------------------|
| Electricity Distribution |                          | none              | none            | none       | none    | none       | none            | none               |
| Fuel Distribution        | down immediately         |                   | none            | none       | none    | min. serv. | none            | none               |
| Health Services          | min. serv.               | min. serv.        |                 | min. serv. | none    | min. serv. | none            | min. serv.         |
| Roads                    | min. serv.               | none              | none            |            | none    | none       | none            | none               |
| Schools                  | min. serv.               | min. serv.        | none            | min. serv. |         | min. serv. | none            | min. serv.         |
| Sewage                   | down immediately         | min. serv.        | none            | min. serv. | none    |            | none            | none               |
| Social Services          | min. serv.               | min. serv.        | none            | min. serv. | none    | min. serv. |                 | min. serv.         |
| Water Distribution       | down immediately         | min. serv.        | none            | min. serv. | none    | min. serv. | none            |                    |

Figure 56 : Matrice de formalisation des dépendances entre les services ou infrastructures. Source : (Hilly et al., 2018).

En se basant sur l'observation selon laquelle les impacts indirects des perturbations d'infrastructures et de services critiques sont souvent négligés dans les évaluations d'impact d'inondation, l'outil Circle (van Ruiten et al., 2016) a quant à lui adopté une approche exclusive à un scénario d'aléa. Cette démarche vise à analyser la séquence d'événements lors d'un scénario d'inondation donné et de structurer les contributions des parties prenantes et des experts, obtenues lors de réunions, d'ateliers et d'entretiens. Ces entrées peuvent aider à identifier les événements pouvant survenir pendant ce type d'inondation, les rôles et responsabilités des acteurs, mais aussi les relations entre les réseaux, les infrastructures, les entités et les parties prenantes. Les scénarios développés servent ensuite de scénarios hypothétiques, et les données sont organisées dans des bases de données et des diagrammes. Ce type de méthodes ne remplacent pas les approches formelles d'analyse des risques, mais y contribuent.

Cette distinction entre les concepts de « descendant » et « ascendant » semble aujourd'hui déjà dépassée par certaines démarches, et nous avons assisté à différentes expériences visant à combiner les différentes visions (De Porcellinis et al., 2009; Marti, 2014; Rome et al., 2009; Velasco, n.d.). Afin d'obtenir une vision plus systémique et plus pertinente, ils combinent les avantages de l'approche descendante, tels que la granularité élevée des composants techniques modélisés et la dimension quantitative des résultats obtenus, avec les avantages de l'approche ascendante, tels que la diversité des objets étudiés et une intégration facilitée dans un contexte local.

Cela nous amène à introduire le concept d'approche fédératrice, qui combine des outils top-down préexistants (Setola et al., 2017) appariés à des simulateurs sectoriels (Di Pietro et al., 2017) au sein d'un méta-logiciel. Les principes de construction d'une approche fédératrice sont représentés à la Figure 57.

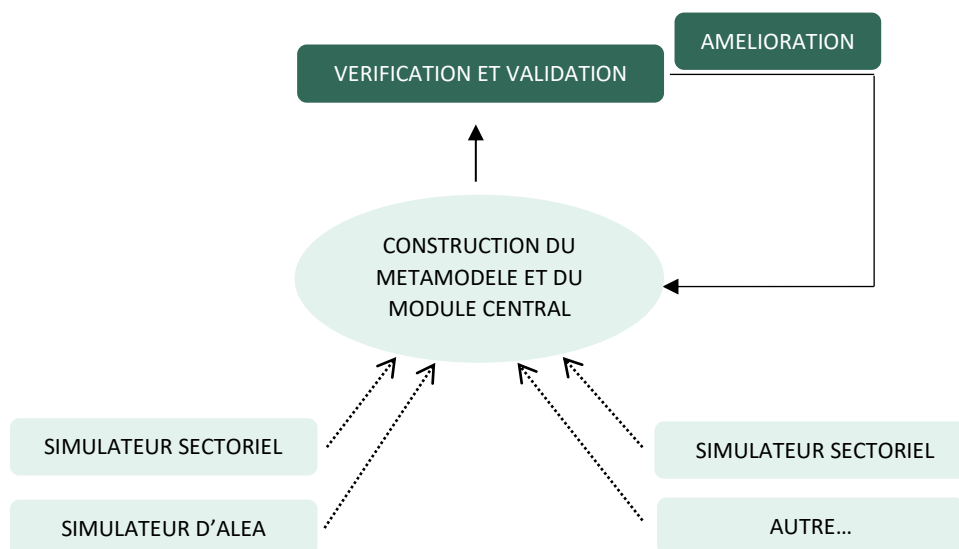


Figure 57 : Construction d'une approche fédératrice.

Les simulateurs sectoriels sont des outils qui tentent de reproduire le comportement d'un système ou d'un réseau. On peut citer par exemple Siemens PSS Sincal (cf. Figure 58), NETOMAC, PowerWorld Simulator et EPfast pour l'électricité ; NS-2 et OMNET ++ pour les télécommunications ; NGfast pour le gaz naturel ; OpenTrack pour les chemins de fer ; FIRST pour les réseaux routiers ; Inforworks ICM pour les réseaux d'assainissement.

L'approche fédératrice combine alors les résultats des simulations parallèles obtenues par chaque simulateur.

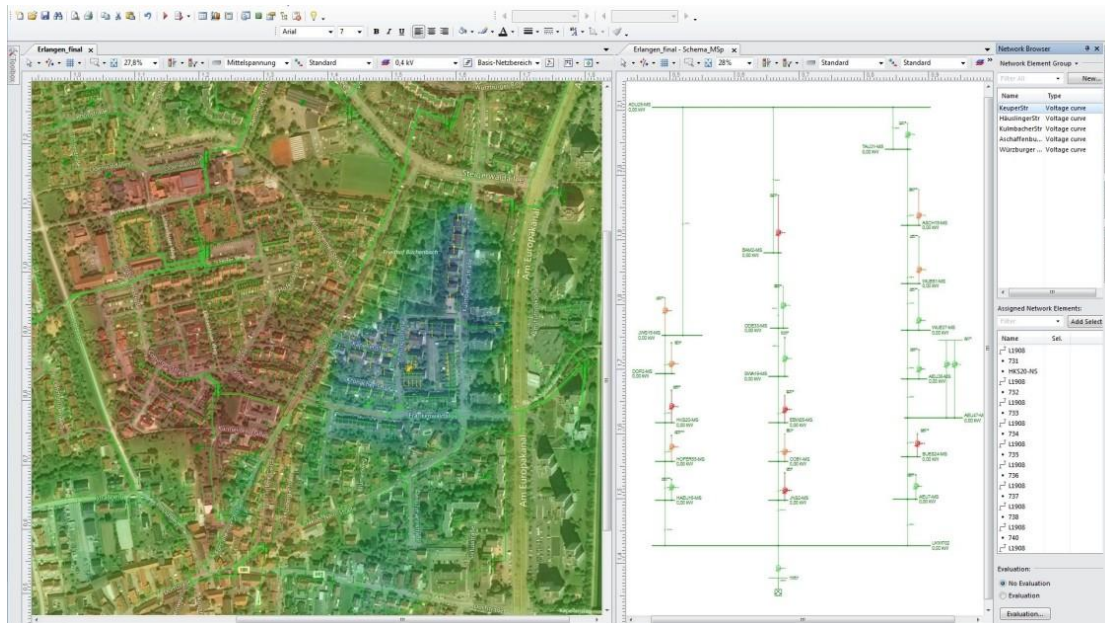


Figure 58 : Capture d'écran de l'interface graphique du module électricité de l'outil PSS Sincal. Source : <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/services/transmission-distribution-smart-grid/consulting-and-planning/pss-software/pss-sincal.html>.

Deux difficultés majeures apparaissent pour ce type d'approche :

- Le défi de l'interopérabilité : la capacité pour différentes simulations, connectées dans une simulation distribuée (Hakiri, 2010), à collaborer de manière significative pour simuler un scénario commun.
- Le défi de la composabilité : la capacité à sélectionner et assembler des composants de la simulation selon diverses combinaisons pour répondre aux besoins spécifiques des utilisateurs) (Petty & Weiseil, 2003).

Il est souligné que la connexion de modèles existants à un modèle réduit court le risque de ne pas capturer le comportement émergent d'infrastructures interdépendantes (Zio & Sansavini, 2011).

Cette approche dite fédératrice peut être reliée au standard d'échange d'informations entre plusieurs simulations développées à l'origine par le ministère Etasunien de la Défense : l'architecture de haut niveau ("High Level Architecture"). Cette approche hybride a été développée à l'époque pour intégrer toutes les approches de simulation et techniques de modélisation utilisées par ce ministère (Dahmann & Morse, 1998). L'architecture de haut niveau comporte trois niveaux d'analyse (Eusgeld et al., 2011b; Nan & Eusgeld, 2011) :

- Le niveau inférieur, qui comprend les modèles des infrastructures uniquement
- Le niveau intermédiaire de l'environnement, qui comprend des modèles d'interactions entre les infrastructures
- Le niveau supérieur, qui représente le modèle global de système de systèmes (Eusgeld, Nan et Dietz, 2011; Nan et Eusgeld, 2011).

Les (inter)dépendances sont capturées par une couche dédiée à la communication, qui permet l'échange d'informations et de commandes entre simulateurs. Ce composant central est également appelé "Runtime Infrastructure", car il permet la concordance des échelles de temps, par exemple entre des simulateurs temporels et des simulateurs basés sur des événements discrets (Nan & Eusgeld, 2011).

De façon parallèle, les approches « multiformales » permettent également d'adapter le choix des langages formels du modèle à la nature, à la complexité au niveau d'abstraction des systèmes considérés (Flammini et al., 2009). Les modèles de dépendances existants peuvent alors être réutilisés. La modularité permet de gérer la complexité et l'hétérogénéité, et la composabilité de représenter des dépendances structurelles ou fonctionnelles.

L'exemple du projet DIESIS (« Design of an Interoperable European federated Simulation network for critical InfraStructures ») permet d'illustrer une approche fédératrice. Ce projet d'envergure, développé entre 2008 et 2012, avait deux objectifs principaux (Beyer et al., 2010; Rome et al., 2009). Tout d'abord, la création d'une plate-forme web pour la recherche commune sur la protection des infrastructures critiques et la simulation d'infrastructures critiques interopérables. Mais également la création d'un outil partagé permettant de simuler les défaillances entre les infrastructures de réseaux clés. L'application fédératrice DIESIS du même nom associe ainsi trois simulateurs sectoriels de réseaux techniques (électricité, télécommunications et chemins de fer) et un simulateur de l'aléa inondation, comme illustré par la Figure 59.

Elle nécessite une interopérabilité sémantique entre ceux-ci (Masucci, 2012), une quantité importante de données sensibles, ainsi que des connaissances théoriques et pratiques approfondies des réseaux et une maîtrise complète des simulateurs sectoriels. Il est théoriquement possible de compléter cet outil avec d'autres simulateurs sectoriels.

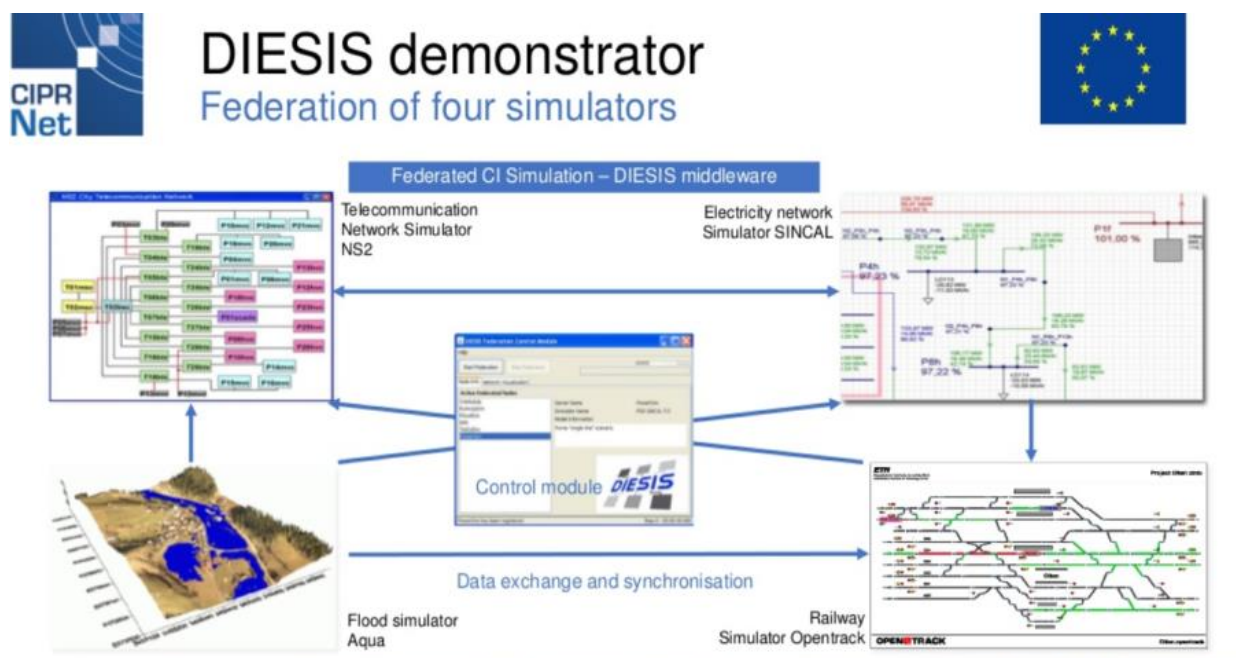


Figure 59 : Schématisation du fonctionnement de DIESIS et de ses composants. Source : (Rome et al., 2009).

EPOCHS (« Electric POWER and Communication synCHronizing Simulator ») est également un environnement de simulation distribuée (Hopkinson et al., 2003) qui fédère de multiples outils de simulation sectoriels, notamment des outils de simulation multi-agents, qu'ils soient utilisés dans des cadres de recherche ou commercial.

EPOCHS associe par des techniques non intrusives (sans modification du code source) un simulateur de transitoires électromagnétiques (PSCAD / EMTDC), un moteur de simulation de transitoires électromécaniques (PSLF) et un simulateur de télécommunications (NS2). Il utilise une « Runtime Infrastructure » pour permettre l'étude de scénarios d'alimentation impliquant une communication entre réseaux, via l'utilisation d'un formalisme à base d'agents.

#### 4.4.3. Application de la typologie aux démarches analysées

Nous proposons finalement dans le Tableau 20 un rangement des démarches étudiées selon la typologie développée ci-dessus, grâce aux analyses menées dans ce chapitre.

Tableau 20 : Proposition de rangement des démarches analysées dans la typologie développée.

| Références  | Démarche  | Catégorie                 |
|---|-----------|---------------------------|
| (Apostolakis & Lemon, 2005)                                       |           | Descendante               |
| (Piller et al., 2017)   | ResiWater | Descendante               |
| (Beyer et al., 2010; Rome et al., 2009)                           | Diesis    | Fédératrice               |
| (Bush et al., 2005a; Bush et al., 2005b)                          | CIP/DSS   | Descendante               |
| (Duflos et al., 2007)   | IRIIS     | Fédératrice               |
| (Hassel et al., 2015; Lange et al., 2015)                         | CASCEFF   | Descendante               |
| (Foglietta, 2013; Kyriakides & Polycarpou, 2014)                  | CISIA     | Descendante - Fédératrice |
| (Barreiro et al., 2017; Fontanals et al., 2014)                   | HAZUR     | Ascendante                |
| (Barreiro et al., 2017; Evans et al., 2018; Velasco et al., 2018) | RESCCUE   | Ascendante - Fédératrice  |
| (Schlobinski, 2015; Zuccarro, 2015)                               | CRISMA    | Descendante ?             |
| (Fotouhi et al., 2017)  |           | Descendante               |
| (Gorbil & Gelenbe, 2009)  |           | Fédératrice               |
| (Gursesli & Desrochers, 2003)                                     |           | Descendante               |
| (Haines et al., 2005)   |           | Descendante               |
| (Hilly et al., 2018)  |           | Ascendante                |
| (Hopkinson et al., 2003)  | EPOCHS    | Fédératrice               |

|  |                 |  |
|--|-----------------|--|
| (Johansson & Hassel, 2010)   |                 | Descendante                              |
| (Klaver et al., 2016)  | PREDICT         | Descendante                              |
| (Laker, 2018; NSW Government, 2018)  | XDI             | Descendante                              |
| (Lew, 2011; Stapelberg, 2008)  | CIPMA           | Descendante                              |
| (Lhomme et al., 2011a)   | FRC             | Descendante                              |
| (Marti, 2014; Wang, 2013)  | I2SIM           | Fédératrice                              |
| (Palumbo et al., 2016; Zuccaro et al., 2018)   | SNOWBALL        | Descendante                              |
| (Petit, Wallace, & Phillip, 2014; Phillips & Tompkins, 2014; Portante et al., 2011; Portante et al., 2016) |                 | Fédératrice                              |
| (Pitilakis et al., 2014; Pitilakis, n.d.)  | SYNER-G         | Ascendante                               |
| (Robert et al., 2013)  | DOMINO          | Ascendante                               |
| (Rozel et al., 2008)   |                 | Descendante - Fédératrice                |
| (van Ruiten et al., 2016)  | INTACT - CIRCLE | Ascendante                               |
| (Panzieri et al., 2004; Setola et al., 2017)   | CIPCAST         | Fédératrice                              |
| (Toubin et al., 2014)  | RESILIS         | Ascendante                               |
| (Tsavdaroglou et al., 2018)  |                 | Ascendante ?                             |
| (Grangeat, 2017)   |                 | Ascendante – Fédératrice<br>« dégradée » |

Il apparaît que certaines démarches peuvent correspondre à plusieurs catégories lorsqu'elles développent à la fois à des briques correspondant aux principes ascendants ou descendants et une approche fédératrice de ces composants.

#### 4.4.4. Discussion

Nous proposons de relier notre analyse des approches de modélisation des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade avec les principes d'analyse analytique et systémique. L'approche analytique, initialement développée par Descartes, est axée sur les composants et repose sur des principes de décomposition et d'exhaustivité. La maîtrise de la complexité d'un système passe cependant par la maîtrise de son « processus d'intégration », c'est-à-dire sa construction par interconnexion et/ou mise en réseau de systèmes de plus petite taille. Ce processus génère notamment l'émergence de nouvelles propriétés (Krob, 2014). Un nouveau paradigme est alors apparu : le raisonnement systémique, qui met en relation des savoirs de nature différente et qui dépasse et transcende les silos classiques de la connaissance (Krob, 2014).

L'approche systémique considère un objet comme un système complexe, c'est-à-dire un objet qui exerce une activité particulière et voit sa structure interne se modifier au fil du temps sans perdre son

identité unique, dans un environnement au sein duquel il entretient des relations avec les autres éléments (Le Moigne, 1974). Les principes structurant de la systémique sont notamment l'interaction « dynamique » entre les éléments (relations de cause à effet et boucles de rétroaction), la globalité (le système réagit différemment de la somme de ses parties), la complexité (auto-organisation et émergence de nouvelles propriétés par la dynamique du système, présence simultanée d'ordre et de désordre) (Durand, 2006; Mérian et al., 2018).

Cette vision systémique est également l'un des principes fondamentaux du concept de résilience dans les domaines de l'écologie (Holling, 1973), de l'ingénierie (Hollnagel et al., 2008) et, dans notre cas, de l'ingénierie urbaine (Lhomme, 2012). Face à la notion de vulnérabilité, centrée sur la notion d'endommagement, la résilience est centrée sur la notion de récupération fonctionnelle (Lhomme et al., 2010). Ce concept est polysémique, assez flou, et il est aujourd'hui utilisé dans des contextes très variés, qu'ils soient scientifiques, académiques, opérationnels ou organisationnels (Carpenter et al., 2001; Reghezza-Zitt et al., 2012). La question centrale à laquelle est associé le flou qui entoure cette notion est la suivante : « la résilience, de quoi, à quoi et pour quoi ? » (Juffé, 2013).

L'UNISDR (Bureau des Nations-Unies pour la réduction des risques de catastrophe) définit quant à lui la résilience comme « la capacité d'un système, une communauté ou une société exposée aux risques de résister, d'absorber, d'accueillir et de corriger les effets d'un danger, en temps opportun et de manière efficace, notamment par la préservation et la restauration de ses structures essentielles et de ses fonctions de base » (UNISDR, 2009). La Figure 60 représente sous forme schématique les multiples dimensions de la résilience des infrastructures, que ce soit en termes de phase de gestion des infrastructures, de composants de cette gestion ou de domaines concernés (Curt & Tacnet, 2018).

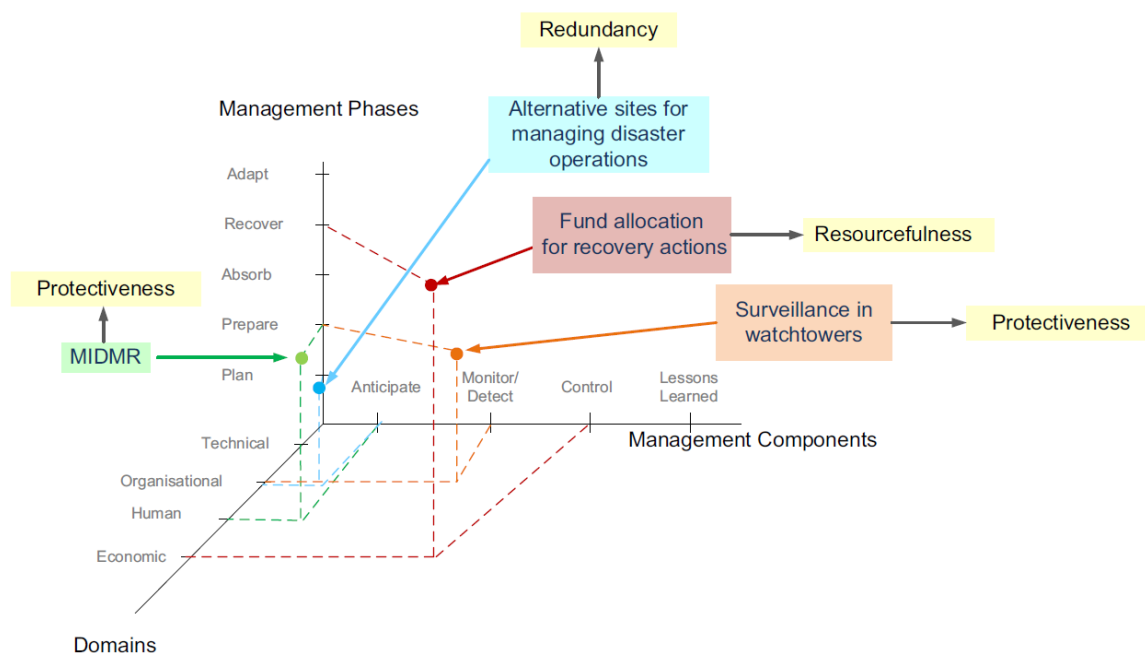


Figure 60 : Représentation des différentes dimensions de la résilience, illustrées par des exemples. Source : (Curt & Tacnet, 2018).

La Figure 61 est une adaptation des recherches de (Beraud, 2013; Le Moigne, 1974) traitant des préceptes respectifs des méthodologies analytiques et systémiques et des facteurs de transition de l'analytique au systémique, mais il complète cette recherche en introduisant les raisons pouvant potentiellement expliquer un retour de l'analyse systémique à l'analytique. Il montre comment les deux méthodologies peuvent être complémentaires si elles sont utilisées conjointement.



Figure 61 : Comparaison des préceptes analytiques et systémiques, complété à partir de (Beraud, 2013; Le Moigne, 1974).

La question du choix des nœuds d'un réseau urbain à prendre en compte dans un modèle d'étude des défaillances en cascade est un exemple récurrent des limites de chacune des approches. Il est en effet extrêmement difficile de modéliser tous les composants d'un système aussi complexe qu'un système urbain et il est souvent décidé de ne modéliser que les composants pertinents et essentiels à la fourniture du service. Toutefois, dans le contexte des défaillances en cascade, un élément qui peut sembler mineur à première vue – c'est-à-dire avant la modélisation détaillée des liens existants entre les composants- peut être à l'origine d'une importante dépendance cachée, masquée par un composant majeur. Une approche systémique n'est pas toujours suffisante pour identifier les nœuds critiques ou les liens à modéliser.

De Porcellinis et al. (2009) ont ainsi travaillé sur un cadre conceptuel combinant la «modélisation holistique», qui traite l'infrastructure ou le système d'infrastructure comme des entités uniques et se rapproche en cela d'une approche systémique globale, et la «modélisation réductionniste», qui traite les systèmes comme des ensembles d'éléments élémentaires interconnectés à décomposer et se rapproche en cela de l'approche analytique.

Cette approche cherche à combiner les deux catégories selon les besoins, et est donc appelée «réductionniste holistique mixte». Des (inter)dépendances peuvent ainsi être considérés entre les composants d'infrastructures identiques ou différentes, mais également entre les différents niveaux d'infrastructures, comme schématisé par la Figure 62 et la Figure 63.



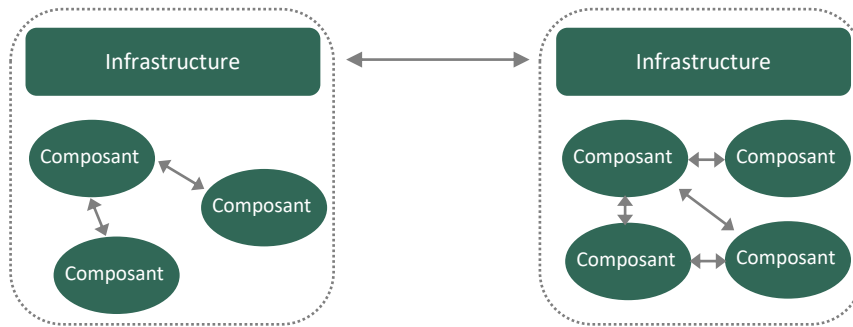


Figure 62 : Les (inter)dépendances telles que considérées dans l'approche habituelle, au niveau de l'infrastructure d'un côté et au niveau du composant de l'autre. Source : adapté de (De Porcellinis, Panzieri, & Setola, 2009).

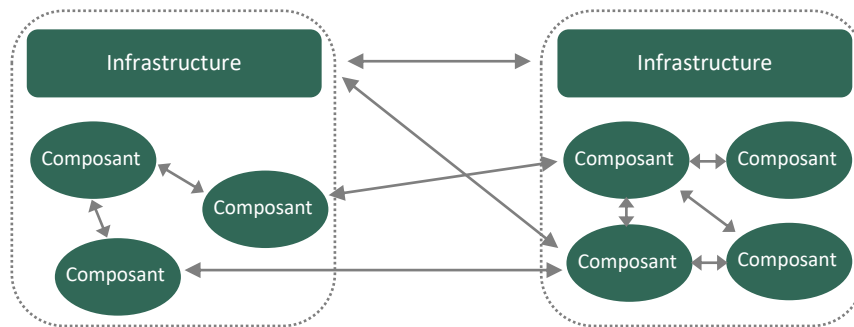


Figure 63 : Les (inter)dépendances telles que considérées au sein de l'approche réductionniste holistique mixte, au niveau des composants, des infrastructures et entre les deux niveaux. Source : adapté de (De Porcellinis, Panzieri, & Setola, 2009).

Des recherches telles que celles menées par Nan & Sansavini (2017) ont porté sur les avantages potentiels d'une approche de modélisation plus hybride, qui soit adaptable à l'échelle spatiale (et donc organisationnelle et technique). La méthodologie proposée est proche de l'approche fédératrice car les sous-systèmes identifiés comme pertinents pour l'étude globale peuvent modélisés à l'aide de différents modèles adaptés. Cependant, les modèles utilisés sont ensuite liés les uns aux autres en fonction des besoins d'échange de données de chacun.

Il est donc possible d'étudier certains composants ou sous-systèmes de manière très détaillée, tandis que d'autres sont étudiés à une échelle beaucoup plus large et beaucoup moins détaillée. L'approche développée par (Foglietta, 2013; Panzieri et al., 2004) se veut un mélange d'approches holistique et réductionniste. Son objectif est d'évaluer les impacts à court terme des défaillances, de faciliter l'analyse de scénarios hypothétiques et d'isoler les éléments critiques. L'outil est basé sur une approche de simulation, comprenant des simulations complexes multi-agents et des bases de données relationnelles, mais les données sont réduites au minimum afin de faciliter la collecte d'informations techniques et sensibles. Chaque réseau semble être différencié en fonction de son fonctionnement et les données sont ensuite transférées vers le niveau supérieur de manière discrète, rappelant ainsi l'approche fédérée. Trois couches non mutuellement exclusives sont définies :

- La couche réductionniste où les infrastructures sont décomposées à base d'agents et où les comportements physiques sont codés.
- La couche de services où les infrastructures sont décomposées selon une perspective plus fonctionnelle, selon les ressources et les services fournis
- La couche holistique, où les interactions globales de niveau supérieur sont analysées et où il est possible de représenter des phénomènes plus complexes et multidimensionnels.

À partir de l'expérience du simulateur CISIA, l'outil MHR – CISIA a par exemple été développé dans l'objectif de prendre en compte les trois couches détaillées ci-dessus et des interactions intra-couche et inter-couche (De Porcellinis et al., 2009).

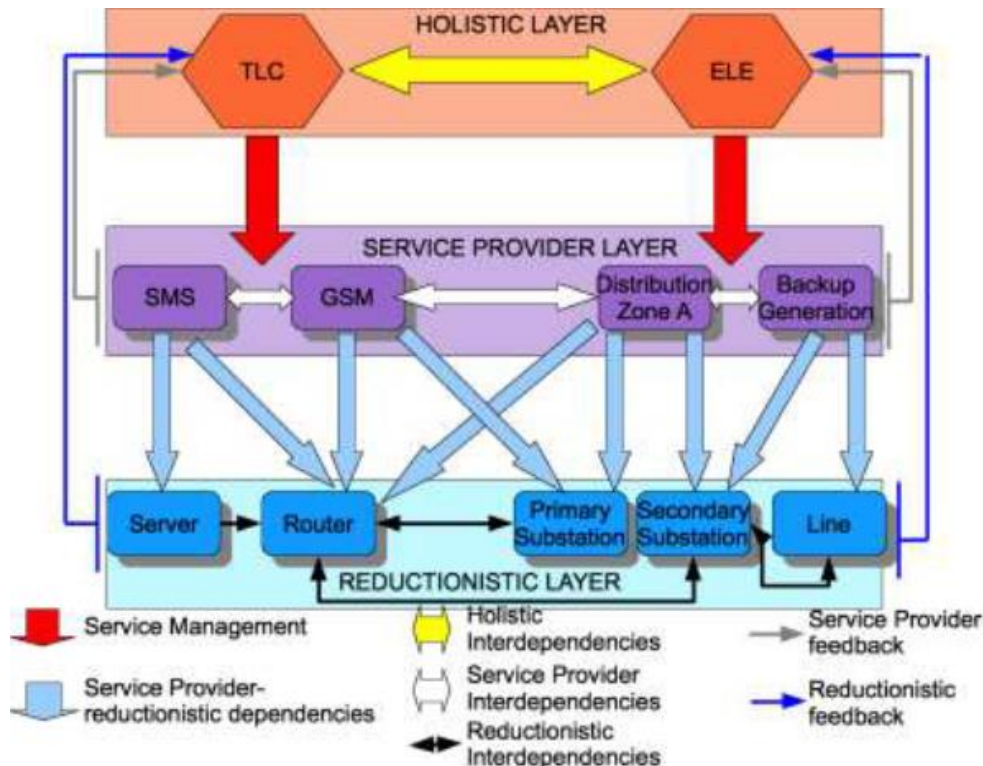


Figure 64 : Structure proposée pour une approche mixte holistique et réductionniste, composée de trois couches en interaction. Source : (Panzieri, 2012).

## 4.5. CONCLUSION

L'état de l'art a permis de mettre en exergue le nombre et la diversité des démarches d'étude des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade existantes à travers le monde. Celles-ci diffèrent en effet au niveau de leurs objectifs, des moyens et ressources nécessaires, des acteurs impliqués, des objets considérés et des échelles étudiées, mais aussi des architectures de modélisation utilisées. Cette caractérisation factuelle et descriptive des différentes démarches de notre échantillon permet de dresser un premier panorama des démarches existantes pour les parties prenantes opérationnelles.

Ce chapitre a également permis de recenser et d'analyser les taxonomies existantes pour catégoriser les démarches d'analyse et de modélisation des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade. Celles-ci se basent principalement sur l'approche de modélisation utilisée et ne considèrent pas les aspects plus opérationnels. La multiplicité des méthodes de modélisation utilisées dans certaines démarches nous a amené à ne pas seulement considérer cette caractéristique. Une typologie basée sur des caractéristiques plus opérationnelles a ainsi été proposée, basée notamment sur l'analyse des processus de mise en œuvre.

L'approche descendante – que l'on peut rapprocher de la vision analytique - détaille le fonctionnement des composants d'un système de manière analytique et théorique, à l'aide d'une hiérarchie descendante, et utilise un formalisme unifié et des hypothèses simplificatrices. L'approche ascendante – que l'on peut rapprocher de la vision systémique - rassemble des démarches systémiques et plus empiriques, qui construisent une théorie à partir d'expériences avant de la consolider progressivement, avec la coopération des parties prenantes et des expertises. L'approche fédératrice dépasse quant à elle les oppositions conceptuelles et combine des outils, principalement descendants, préexistants et des simulateurs sectoriels (spécifique à un secteur, un type de réseau...) au sein d'un méta-logiciel.

# CHAPITRE 5 : LES DEFIS D'UNE MISE EN OEUVRE OPERATIONNELLE

Ce chapitre vise à dresser un panorama des enjeux et des défis rencontrés au cours de la mise en œuvre d'une démarche dans un contexte réel. Il se propose notamment d'identifier les difficultés opérationnelles auxquelles se heurtent les porteurs et utilisateurs de ces démarches lors de la mise en œuvre.

Nous observons en effet à travers l'état de l'art que les démarches implémentées peuvent être en inadéquation avec la réalité opérationnelle, et que leur mise en œuvre s'en retrouve fragilisée. Trois enjeux majeurs ont donc été recensés à travers les travaux bibliographiques, l'état de l'art des démarches et de leurs implémentations, les rencontres avec les parties prenantes – que ce soit au niveau de notre contexte francilien ou ailleurs –, et les expériences menées dans le cadre des projets de recherche RGC4 et RESCCUE : la participation des parties prenantes locales, le renseignement des modèles et la concordance de la granularité de l'étude au contexte de mise en œuvre. Ce chapitre aborde ainsi la question de l'implication parfois difficile des parties prenantes dans un sous-chapitre dédié, puis la question des données nécessaires bien que nombreuses, éparses et imparfaites, et enfin la question complexe de la granularité de l'étude.

## 5.1. LA DIFFICILE, MAIS NECESSAIRE, IMPLICATION DES ACTEURS

La problématique des réseaux techniques urbains est à la croisée de nombreux enjeux : des enjeux sécuritaires, des enjeux économiques, des enjeux de bien-être, des enjeux sanitaires... Ces différents enjeux sont incarnés par différentes parties prenantes jouant un rôle dans leur gestion, leur régulation, leur exploitation ou leur utilisation. Celles-ci sont nombreuses et diverses, et ne portent pas les mêmes intérêts, comme nous le verrons ci-dessous. L'implication de ces parties prenantes dans le cadre d'une démarche d'identification, d'analyse et de modélisation des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade est indispensable pour sa réussite. Cependant, nous verrons que cette implication se heurte à de nombreuses difficultés.

### 5.1.1. L'importance de l'implication des différentes parties prenantes

L'implication des parties prenantes concernant un sujet complexe tel que le nôtre est à la fois un moyen d'atteindre les objectifs d'un projet, en améliorant la connaissance et la prise en compte des intérêts de chacun, et un objectif en soi pour répondre aux exigences de concertation et pour faciliter l'acceptation et la mise en œuvre des solutions identifiées (Toubin, 2014). Les approches collaboratives, impliquant au moins les décideurs et les experts (voir Figure 65), permettent également de sensibiliser et de motiver les acteurs ayant un rôle à jouer dans l'identification ou la résolution du problème. La création d'un réseau d'acteurs est alors bénéfique, de par l'installation d'un lien de confiance, d'échanges et la construction d'une réaction d'émulation qui favorisent l'innovation (Rijke et al., 2013).

La nécessité de l'implication des parties prenantes va plus loin dans le cadre de notre problématique, car une démarche d'identification, d'analyse et de modélisation des relations d'(inter)dépendance et

des phénomènes de défaillances en cascade ne peut être appliquée sans le renseignement d'informations concernant tous les systèmes impliqués. Les acteurs locaux représentent donc les principales sources d'informations, voire les "implémenteurs" de ces démarches.

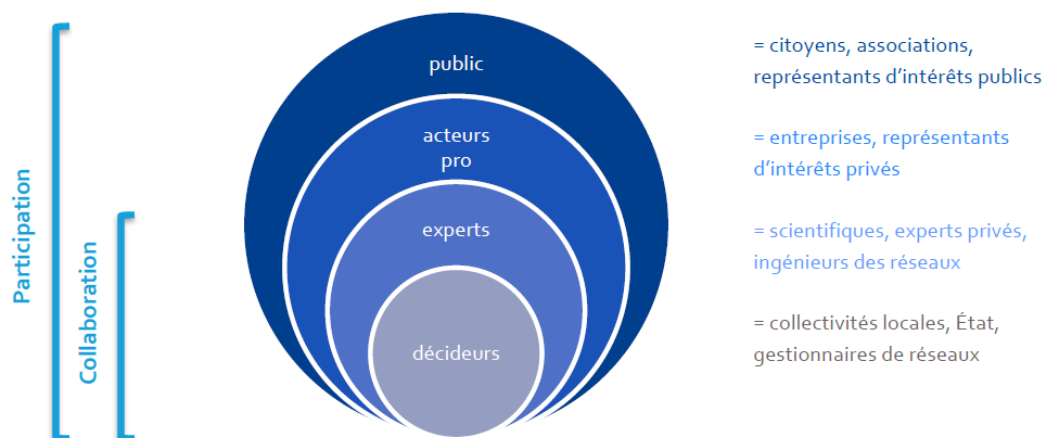


Figure 65 : Echelle des acteurs de la participation à la collaboration. Source : (Toubin, 2014).

Le besoin d'une certaine forme d'interaction entre les opérateurs d'infrastructures et les autorités gouvernementales au sujet des infrastructures critiques a été soulignée par rapport spécial de l'OTAN portant sur la protection des infrastructures critiques (NATO, 2007). Les auteurs ont associé aux différentes étapes identifiées les types de responsabilités correspondantes, comme synthétisé dans le Tableau 21. La totalité des étapes correspond alors à des responsabilités partagées entre le gouvernement et les opérateurs, à l'exception de la définition des infrastructures critiques dont la responsabilité revient aux gouvernements.

Tableau 21 : Responsabilités associées aux différentes actions relatives aux infrastructures critiques. Source : (NATO, 2007).

| Etapes   | Type de responsabilité | Autorité responsable   |
|--|------------------------|--|
| Définir les infrastructures critiques  | Exclusive              | Gouvernement   |
| Identifier les infrastructures critiques   | Partagée               | Entrées des opérateurs<br>Guidage du gouvernement (standards, méthodologie, supervision)   |
| Evaluer le risque :<br>Evaluer la menace<br>Evaluer la vulnérabilité et les conséquences | Partagée               | Gouvernement (services de renseignement) au niveau national / Opérateurs pour le niveau infrastructure<br>Principalement les opérateurs / Guidage du gouvernement (standards, méthodologie, supervision) |
| Définir et implémenter des mesures de protection   | Partagée               | Principalement les opérateurs<br>Support du gouvernement   |
| Fixer des priorités de protection  | Partagée               | Gouvernement / Opérateurs  |
| Examiner l'implémentation de la stratégie  | Partagée               | Gouvernement / Opérateurs  |

### 5.1.2. Le contexte français

Concernant les spécificités nationales en matière de responsabilités, le modèle français se montre assez interventionniste sur le sujet notamment concernant la surveillance des « opérateurs d'importance vitale ». Ceux-ci sont en effet identifiés et désignés, puis chargés du recensement des points d'importance vitale et de la mise en place d'un « plan de sécurité d'opérateur » afin d'être considérés conformes selon la directive de sécurité du secteur dont ils dépendent. Bien que tous les États reconnaissent la nécessité d'un partenariat public-privé sur cette question, la répartition des tâches entre les acteurs publics et privés varie selon les pays, avec des États qui mettent l'accent sur la responsabilité première des pouvoirs publics et leur réglementation, et d'autres qui considèrent que les opérateurs doivent occuper un rôle central.

Cette différenciation entre gouvernement et opérateurs revient de façon simplificatrice à dire que les services de l'Etat et les collectivités ont pour mission de réguler et de surveiller les activités relatives aux services urbains et à leurs réseaux techniques, tandis que les gestionnaires de réseaux ont pour mission de gérer et d'exploiter les réseaux techniques urbains. Le processus d'élaboration et de mise en œuvre d'une méthode d'identification, de modélisation, de simulation des (inter) dépendances et des défaillances en cascade ne peut être véritablement réussi sans une collaboration étroite entre les ces différents acteurs. Les uns portent en effet les objectifs d'amélioration de la résilience et de la sécurité des services essentiels mais aussi des citoyens, tandis que les autres sont les utilisateurs principaux d'une telle démarche mais aussi les sources d'informations principales.

Une cartographie des acteurs franciliens présentée dans la Figure 66 avait été proposée il y a quelques années et soulignait déjà la complexité de cet écosystème et des relations en son sein (Toubin et al., 2012). On y distingue notamment les services de l'Etat, les collectivités, et les opérateurs de réseaux.

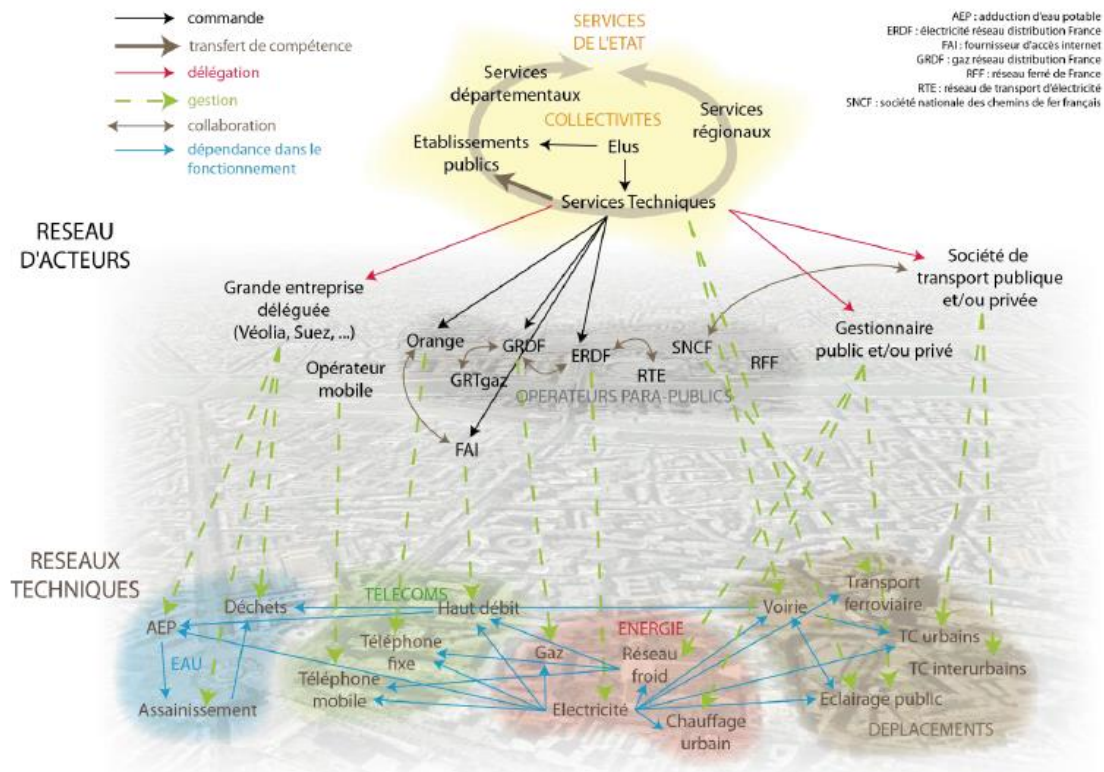


Figure 66 : Des réseaux (inter)dépendants et des acteurs nombreux et déconnectés (Toubin et al, 2012)

Une étude plus fine des différentes parties prenantes, dépassant la dichotomie gouvernement / opérateurs nous semble toutefois nécessaire pour cerner les contours d'une collaboration potentielle. Les acteurs français orbitant autour de la problématique des réseaux techniques urbains sont ainsi listés dans le Tableau 22, ainsi que leurs attributions et missions relatives à notre problématique.

Tableau 22 : Répartition des attributions et missions relatives à la place des réseaux techniques au sein des problématiques de gestion de crise et de sécurité civile entre les parties prenantes.

| Catégories  | Acteurs                                      | Attributions et missions relatives à la place des réseaux techniques au sein des problématiques de gestion de crise et de sécurité civile   |
|---|--|---|
| « Gouvernement »<br>Services de l'Etat et collectivités | Premier ministre / SGDSN                     | <p>Le secrétariat général de la défense et de la sécurité nationale assure, par délégation du premier ministre, le cadrage, le pilotage et la coordination interministérielle du dispositif « Sécurité des activités d'importance vitale (SAIV) » / « Opérateurs d'importance vitale (OIV) » / « Points d'importance vitale (PIV) ». Il approuve les directives nationales de sécurité (DNS).</p> <p>Le premier ministre peut se retrouver en charge de la gestion d'une crise de niveau national.</p>  |
|   | Ministères                                   | <p>Les ministères coordonnateurs sont chargés de rédiger les DNS de chaque secteur (et sous-secteur) d'activités d'importance vitale en indiquant les enjeux, les vulnérabilités, les menaces qui doivent être prises en compte et en définissant les objectifs de sécurité du secteur. Les ministères coordonnateurs sont également les points de contacts privilégiés des opérateurs. Les ministres peuvent se retrouver en charge de la gestion d'une crise de niveau national concernant leur périmètre de responsabilité.</p> <p>L'État élabore et met également en application des plans de prévention des risques (PPR) naturels (inondations, mouvements de terrain, avalanches, séismes...). Ces plans visent notamment à délimiter les zones exposées aux risques, à définir les mesures de prévention, de protection et de sauvegarde qui doivent être prises par les collectivités, les organisations voire les particuliers.</p> <p>Un PPR peut également définir des règles relatives aux réseaux et infrastructures desservant son périmètre pour faciliter les éventuelles mesures d'évacuation ou l'intervention des secours (exemple de Paris).</p> |
|   | Directions régionales des services de l'Etat | <p>Le préfet de zone est assisté par un délégué ministériel de zone (DMZ), qui est le directeur de la DREAL, lui-même secondé pour cette fonction par un adjoint défense et sécurité (ADS). (NB : le préfet de zone de défense de l'Île-de-France n'est pas le préfet de région mais le préfet de police).</p>  |
|   | Départements                                 | <p>Au niveau départemental, le préfet, assisté par le directeur de cabinet et par le chef du service interministériel des affaires civiles et économiques de défense et de la protection civile (SIACEDPC) est responsable de la gestion de crise.</p> <p>Le préfet de département approuve, pour chaque PIV, le plan particulier de protection (PPP) rédigé par l'opérateur. Il élabore également un plan de protection externe (PPE) comportant les mesures de vigilance et</p>   |

|                          |                                     |  |
|--------------------------|-------------------------------------|--|
|                          |                                     | <p>d'intervention prévues en cas de menace ou d'attentat visant ce point d'importance vitale.</p> <p>Un guide ORSEC départemental et zonal pour le rétablissement et l'approvisionnement d'urgence des réseaux dresse la liste des réseaux dont le bon fonctionnement est critique pour les populations, et dont le rétablissement est prioritaire ou conditionne celui de ces autres réseaux.</p>   |
|                          | Zones de Défense et de Sécurité     | <p>Le préfet de zone est l'acteur territorial en charge de la coordination du dispositif SAIV. Il a un rôle d'animation, d'appui aux préfetures et de relais d'information entre l'échelon central et les échelons départementaux. Il coordonne également les inspections des PIV situés dans sa zone de compétence.</p> <p>De plus, le préfet de zone dirige les opérations lors d'une crise de niveau départemental ou régionale. Un guide ORSEC départemental et zonal pour le rétablissement et l'approvisionnement d'urgence des réseaux dresse la liste des réseaux dont le bon fonctionnement est critique pour les populations, et dont le rétablissement est prioritaire ou conditionne celui de ces autres réseaux (électricité, communications, eau et assainissement, gaz et hydrocarbures).</p>   |
|                          | Communautés de communes et communes | <p>La gestion de crise et la sécurité civile demeure l'affaire du Maire au niveau communal. En tant que directeur des opérations de secours sur le territoire de sa commune, il établit un Plan Communal de Sauvegarde (PCS) qui permet de se préparer à une crise au niveau organisationnel et technique, en cas d'accident ou de catastrophe.</p> <p>Le maire est également responsable de la continuité des services publics essentiels dans son ressort territorial.</p>   |
| Gestionnaires de réseaux | Opérateurs d'Importance Vitale      | <p>Les opérateurs désignés comme Opérateurs d'Importance Vitale doivent répondre à plusieurs types d'obligations : la désignation d'un délégué pour la défense et la sécurité (interlocuteur privilégié de l'autorité administrative), la rédaction d'un plan de sécurité d'opérateur (PSO) qui décrit l'organisation et la politique de sécurité de l'opérateur, l'élaboration d'un plan de continuité d'activité (PCA) ; la rédaction de plans particuliers de protection (PPP) pour chacun des points d'importance vitale identifiés.</p>   |
|                          | Tous les gestionnaires              | <p>La loi de modernisation de la sécurité civile exige des exploitants de réseaux (assainissement, eau, électricité, gaz, communications) une obligation de continuité de fourniture de services aux populations en cas de crise et le maintien de la satisfaction des besoins prioritaires de la population. Les cahiers des charges ou contrats régissant les concessions ou délégations de service public tiennent compte de ces obligations, et précisent des niveaux d'exigence et des délais de mise en œuvre.</p> <p>Un opérateur doit être en mesure de gérer de façon autonome une crise et d'informer les pouvoirs publics. Cependant si plusieurs réseaux sont fortement perturbés ou en rupture d'approvisionnement, la crise est qualifiée de crise de sécurité civile et la situation est considérée comme dépassant la capacité d'action d'un opérateur isolé. Les puissances publiques doivent intervenir et coordonner les actions des opérateurs, et procéder le cas échéant à des arbitrages.</p> |



### 5.1.3. De nombreuses barrières à surmonter

Cette nécessité de collaboration entre des acteurs poursuivant des objectifs divers et répondant à des besoins et contraintes variés, se heurte à plusieurs difficultés recensées ci-dessous. Ces barrières entraînent alors parfois des blocages, des augmentations de délais, des complications logistiques, ou peuvent nécessiter que les données soient rendues imprécises à dessein.

#### 5.1.3.1. Une réglementation française peu contraignante

Les réseaux urbains représentent des enjeux majeurs du bon fonctionnement de nos villes. Etant souvent gérés et exploités de façon complexe, ils font l'objet de différentes réglementations dans plusieurs textes de référence. Nous nous plaçons ici dans le contexte réglementaire français car notre cas d'étude est français (agglomération parisienne) et qu'il serait difficile de dresser un panorama international exhaustif.

La loi 2004-811 du 13 août 2004 de modernisation de la sécurité civile stipule dans son article 6 que les opérateurs de réseaux doivent prendre les mesures nécessaires pour assurer les besoins prioritaires de la population en cas de crise : « Les exploitants d'un service, destiné au public, d'assainissement, de production ou de distribution d'eau pour la consommation humaine, d'électricité ou de gaz, ainsi que les opérateurs des réseaux de communications électroniques ouverts au public prévoient les mesures nécessaires au maintien de la satisfaction des besoins prioritaires de la population lors des situations de crise. Ces besoins prioritaires, définis par décret en Conseil d'Etat, sont pris en compte dans les cahiers des charges ou contrats régissant les concessions ou délégations de service public et dans les actes réglementaires encadrant les activités précitées. Ce décret précise le niveau d'exigence et les délais d'application requis pour leur mise en œuvre. (LOI N° 2004-811 Du 13 Août 2004 de Modernisation de La Sécurité Civile, 2004). Ces dispositions ont depuis été intégrées par voie d'ordonnance dans le Code de la sécurité intérieure, au niveau des articles L732-1 à L372-4.

Au niveau des Zones de Défense et de Sécurité, des dispositions du plan ORSEC (Organisation de Réponse en Sécurité Civile) portent sur l'obligation des exploitants de réseaux d'assurer la satisfaction des besoins prioritaires (c'est-à-dire l'électricité, l'eau potable et l'assainissement, le gaz, les communications électroniques). Leurs exploitants doivent mettre en œuvre les moyens nécessaires en vue du rétablissement des réseaux dans les meilleurs délais et suivre les consignes des préfets, notamment concernant les rétablissements prioritaires. La protection des « installations d'importance vitale », qui regroupent tous les réseaux comme nous l'entendons à l'exception de celui de gestion des déchets, a quant à elle été introduite en 2004 dans la partie relative à la défense économique du Code de la Défense. Elle implique quelque 250 opérateurs d'importance vitale qui sont responsables de près de 1 400 points d'importance vitale. Un important travail de rationalisation et de simplification a été entrepris depuis 2013, et ces opérateurs sont aujourd'hui incités à élaborer des plans de continuité d'activités.

Il ressort ici assez clairement qu'un potentiel travail centralisé sur les questions de dépendances entre et au sein des différents réseaux techniques n'est pas envisagé dans ces différents textes. Les acteurs, notamment privés, n'ont donc pas obligation concernant le partage d'informations relatives à leurs dépendances entrantes et sortantes ou leurs vulnérabilités. On peut également suspecter que le secteur privé hésite à partager des données, craignant que ces données ne servent un jour de base à des mesures réglementaires.

#### 5.1.3.2. Les barrières sécuritaires

Des enjeux de sécurité nationale peuvent également entrer en jeu, liés à la nature des réseaux ou à la nature des données. Les risques terroristes ou l'espionnage industriel en font partie, pour tous les types de réseaux essentiels au fonctionnement urbain, notamment dans les grandes agglomérations. Les parties prenantes peuvent être limitées par des questions de confidentialité de différentes origines, notamment concernant leurs fournisseurs et clients. Il existe cependant des moyens pour rendre une donnée confidentielle moins sensible. Il est possible d'utiliser un découpage du territoire en mailles pour éviter la localisation précise des infrastructures, de « flouter » (rendre moins précises) les informations, de mettre en place des accès différenciés selon les niveaux d'autorisations des parties prenantes...

#### 5.1.3.3. Les barrières économiques et concurrentielles

Les aspects économiques et concurrentiels peuvent également constituer une difficulté supplémentaire à la collaboration entre acteurs publics et privés sur ce sujet. En effet, l'attribution de moyens et de ressources (allocation de ressources humaines, assignation d'un budget, formation des personnels...) peut se révéler compliquée pour certains acteurs, et peut représenter un investissement conséquent en termes économiques. Il est parfois difficile pour ces acteurs de réaliser les gains potentiels d'une telle démarche, notamment en termes de comparaison coûts / bénéfices, car les bénéfices ne sont pas toujours tangibles. On estime également qu'une certaine réticence peut provenir du fait que les différents opérateurs sont clients les uns des autres, et ne souhaitent pas forcément que leurs clients aient accès à des données considérées comme sensibles au niveau commercial.

De plus, des questions de concurrence peuvent apparaître et devenir une barrière au partage d'informations sensibles, notamment pour les secteurs où plusieurs opérateurs se partagent le marché. Le secteur des télécommunications est l'exemple majeur de ce type de relations concurrentielles, où certaines informations techniques (concernant par exemple le déploiement) ont une forte valeur concurrentielle. La potentielle fuite vers le grand public de données portant par exemple sur les vulnérabilités de réseaux concurrentiels est encore un autre risque que certains ne sont pas prêts à prendre.

#### 5.1.3.4. Les barrières politiques

Des enjeux politiques sous-jacents se font également sentir. Le sujet des réseaux techniques urbains est en effet éminemment politique, du fait de leur importance dans le fonctionnement de la ville et de la multiplicité des acteurs impliqués. Ces acteurs peuvent en effet être rattachés à divers échelons administratifs, à divers périmètres géographiques, ils peuvent être privés ou publics, voire parapublics... Des questions de politiques locales ou plus larges, de relations d'influence peuvent alors entrer en jeu et avoir leur importance dans l'instauration de processus de collaboration.

#### 5.1.3.5. Réussir à impliquer les parties prenantes

La question qui se pose alors est : comment réussir à impliquer les différents acteurs selon leurs objectifs, contraintes et ressources et leurs différences culturelles ? Plusieurs auteurs se sont penchés sur la question. Certains prônent la collaboration non réglementée, et le partage d'informations de qualité plutôt qu'en quantité (Givens & Busch, 2013). Certains auteurs estiment quant à eux que les enjeux et rouages du marché ne suffiront pas à réduire la vulnérabilité à des défaillances de grande échelle et à rendre les services plus robustes et résilients. Une collaboration entre les acteurs publics

et privés est alors nécessaire, pour notamment définir des responsabilités et créer des institutions dédiées (Auerswald et al., 2006). Certains estiment alors que l'échelon des collectivités territoriales est pertinent, à condition que celles-ci en ait la capacité et les moyens, pour agir en tant que facilitateur entre le gouvernement, les parties prenantes locales et le secteur privé (Zevenbergen et al., 2008).

La collaboration est d'ailleurs un des facteurs de résilience identifié par Murray-Tuite (2006). La coopération entre les secteurs publics et privés améliore les capacités de préparation, de réponse, et de relèvement face à des catastrophes (Council et al., 2011). Le secteur privé rassemble ici les entreprises, les organisations non-gouvernementales, les institutions techniques et académiques etc. Les bénéfices peuvent aller de l'amélioration de la coordination entre acteurs à la construction d'un réseau de confiance; de l'accès à de nouvelles connaissances concernant les risques, les infrastructures critiques et les (inter)dépendances jusqu'à la mise en œuvre d'une démarche collective. Un cadre conceptuel de la collaboration entre le secteur public et le secteur privé a été proposé par la National Academy of Sciences américaine, qui est repris dans la Figure 67. Ce cadre identifie les facteurs, les acteurs, les principes de mise en œuvre, les bénéfices et les résultats d'une collaboration public-privé pour l'amélioration de la résilience. La question des incitations y est évoquée, ainsi que l'institutionnalisation de cette collaboration.

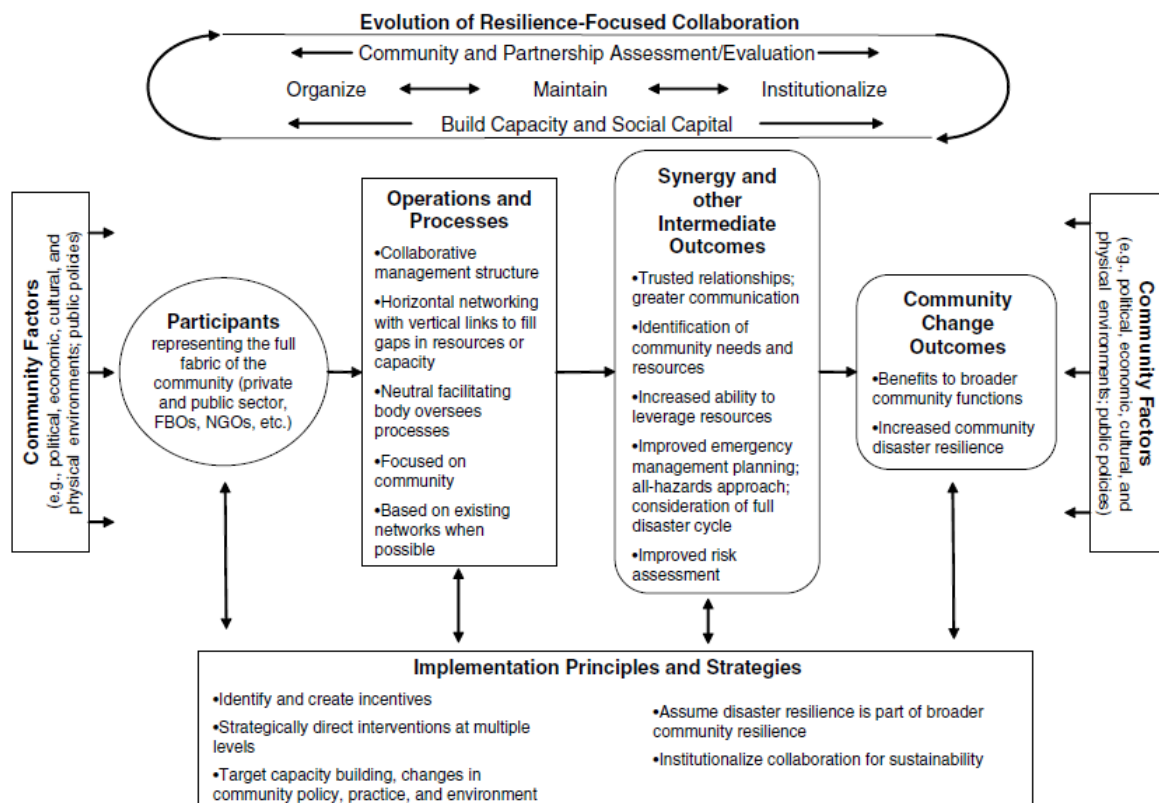


Figure 67 : Modèle conceptuel de collaboration entre le secteur privé et le secteur public pour renforcer la résilience des communautés. Source : (Council et al., 2011).

L'Agence Européenne pour la sécurité des réseaux et de l'information s'est quant à elle intéressée aux motivations des acteurs publics et privés à s'engager dans un partenariat public-privé, et dresse un panorama intéressant des enjeux et intérêts sous-jacents, repris dans le Tableau 23. On retrouve l'idée d'amélioration des relations par l'instauration d'un lien de confiance, de partage des savoirs et expertises, et d'amélioration de la résilience. La question de l'accès à des fonds publics ou d'une opportunité d'influence des pouvoirs publics est également soulevée du côté du privé. Du côté du

public, l'accès à des ressources spécifiques et la possibilité de créer des méta-synergies entre diverses initiatives est citée.

Tableau 23 : Les motivations des secteurs privé et public à participer à un partenariat public-privé (PPP).  
Source : (ENISA, 2017).

| Les raisons du secteur privé à participer à un partenariat public-privé  | Les raisons du secteur public à participer à un partenariat public-privé  |
|--|---|
| Accès à des fonds publics  | Meilleure compréhension de la problématique de la protection des infrastructures critiques et de l'industrie en général                       |
| Opportunité d'influencer la législation nationale et les normes obligatoires   | Possibilité de créer des synergies entre différentes initiatives du secteur privé   |
| Accès à la connaissance du secteur public et à des informations confidentielles (réglementation européenne, lutte contre la cybercriminalité)  | Accès à des ressources du secteur privé (par exemple des experts qualifiés), qui facilitent la mise en place de normes et de bonnes pratiques |
| Assurance que les produits livrés à travers le PPP sont de bonne qualité, car ils sont garantis par le gouvernement  |   |
| Partager le savoir, les expériences et les bonnes pratiques  |   |
| Aider à atteindre la résilience au sein de l'écosystème cyber  |   |
| Améliorer la confiance entre les acteurs public / public, privé / privé et public / privé – les partenariats public-privé permettent de rencontrer des acteurs différents et d'apprendre à les connaître, et ainsi de permettre l'accès à de meilleures informations et une attitude proactive en cas de crise |   |
| Obtenir des contacts directs et crédibles avec les autres organisations  |   |

Il convient également de souligner l'importance et le poids des réglementations et obligations légales auxquelles peuvent être soumis les acteurs privés par exemple. Cette question de l'implication et des motivations des parties prenantes sera approfondie et illustrée dans la partie III pour le contexte francilien.

## 5.2. LES DONNEES : NOMBREUSES, EPARSEES, IMPARFAITES MAIS INDISPENSABLES

Bien que certains modèles et simulations développés à travers le monde soient aujourd'hui capables d'obtenir théoriquement des résultats détaillés avec une granularité fine, ceux-ci ne peuvent fonctionner qu'en étant nourris d'un nombre très conséquent de données. La disponibilité des données – techniques ou non - nécessaires au renseignement de ces modèles est alors une condition indispensable à leur mise en œuvre.

Ces données se révèlent cependant difficiles à rassembler pour plusieurs raisons : elles sont très nombreuses, dynamiques, diverses dans leur forme et leur fond, et elles peuvent être imparfaites mais aussi indisponibles pour plusieurs raisons. Ces difficultés et les enjeux correspondants sont précisés ci-dessous.

### 5.2.1. Les données relatives aux réseaux techniques urbains

Les données relatives aux systèmes étudiés (les réseaux techniques urbains et leurs infrastructures, les liens d’(inter)dépendances, les vulnérabilités aux aléas, le contexte, les impacts potentiels des défaillances...), et nécessaires au renseignement et à la mise en œuvre des démarches discutées, sont caractérisés ci-dessous.

#### 5.2.1.1. Des données nombreuses

Les réseaux techniques urbains étant des systèmes complexes et ouverts, en interaction les uns avec les autres et en interaction avec leur environnement, de nombreux facteurs et variables entrent en jeu dans l’identification et la modélisation des phénomènes d’(inter)dépendances et de défaillances en cascade potentiels. Cette observation amène à penser qu’un grand nombre de données doivent être traitées pour y parvenir. Lewis (2006) souligne que la protection des réseaux urbains conduit à traiter une masse importante d’informations et que surtout, dans ce contexte, le choix des informations appropriées est un vrai défi. Dans ce cadre, une bonne compréhension des réseaux apparaît comme un prérequis pour mettre en place un processus pertinent et adapté.

L’augmentation de la complexité des modèles peut conduire à des représentations plus sophistiquées et détaillées, mais augmente de fait la quantité et la granularité des données nécessaires pour le renseignement du modèle (Oliva et al., 2012). Wallace et al. (2001) indiquent qu’il est important d’avoir des modèles qui permettent de suivre et contrôler les réseaux urbains à une échelle assez large. Ils signalent que l’augmentation croissante du nombre d’infrastructures et de leur complexité nécessite la mise en place de modèles parcimonieux et ciblés afin de limiter le nombre de données à traiter. La question de la sélection des éléments et informations pertinentes pour caractériser le fonctionnement des réseaux techniques urbains émerge alors.

#### 5.2.1.2. Des données diverses

Ces données, en plus d’être nombreuses, sont également très diverses car elles se rapportent à des éléments variés, complexes, qui entretiennent des relations évolutives avec leur environnement. Elles peuvent caractériser le contexte d’élaboration et de mise en œuvre, les objets modélisés et leurs propriétés et comportements, les interactions entre les objets modélisés (voire les éléments contextuels), les conséquences et impacts des défaillances et cascade... Cette diversité est illustrée par le Tableau 24, repris du chapitre 4.

Tableau 24 : Recensement des catégories de données d’entrée rencontrées

| Sujet        | Description   |
|--------------|---|
| Contexte     | Aléas, scénarios climatiques, morphologie du territoire, parties prenantes, etc.  |
| Objets       | Propriétés physiques, données techniques détaillées, données sur les agents, retours intégrés des opérateurs, données brutes des opérateurs, vulnérabilité des objets, équations des opérations, avis d’experts, etc.   |
| Interactions | Données techniques détaillées, (inter)dépendances économiques et fonctionnelles, règles d’agents, avis d’experts, ressources nécessaires, actions humaines, flux, retours intégrés des opérateurs, données brutes des opérateurs, équations opérationnelles, résultats des simulateurs sectoriels, etc. |
| Conséquences | Capacités opérationnelles, rapports de retours d’expérience, décisions humaines, retours d’expériences intégrés des opérateurs, éléments de contexte, données des capteurs, résultats des simulateurs sectoriels, avis d’experts, courbes de dommages, estimations de pertes, etc.                      |

Cette diversité augmente la complexité de la collecte des données. Elle illustre également les potentielles incohérences entre les formats de données utilisés par les différents acteurs, et donc la nécessité d'un travail de mise en cohérence et de traduction de celles-ci avant le renseignement des modèles. En effet, les informations partagées peuvent ne pas dépendre des mêmes référentiels (de scénarios, d'échelle, d'hypothèses...) et entraîner des erreurs et des imprécisions.

#### 5.2.1.3. Des données imparfaites

La question des imperfections des données manipulées ne peut être éludée car elle est centrale. Les acteurs possèdent généralement une connaissance assez fine du comportement de leurs infrastructures, tandis que la compréhension des liens de dépendances entre plusieurs infrastructures, appartenant parfois à de réseaux différents, est beaucoup moins avancée. Les différentes sources d'informations mises à contribution peuvent produire des informations vagues, parfois contradictoires, souvent sous forme linguistique et donc interprétables.

Ces imperfections peuvent être de plusieurs natures :

- Les imperfections concernant l'existence des données, c'est-à-dire l'incomplétude : Les informations peuvent être indisponibles ou même inexistantes, de façon réductible (c'est-à-dire qu'on peut la réduire avec des études plus poussées) ou irréductible. Exemples : des dépendances ou des dégâts ou des impacts non identifiés, des protections non recensées...
- Les imperfections concernant leur contenu, c'est-à-dire l'imprécision et l'inconsistante : Les informations peuvent être insuffisantes pour prendre une décision, ou en conflit entre elles. L'inconsistance peut concerner toutes les variables. Exemples : des autonomies comprises entre x et y heures, des quantités de ressources comprises entre x et y, des degrés de vraisemblance entre faible et moyen, des avis d'experts divergents sur des temporalités de mesures à prendre...
- Les imperfections concernant leur validité, c'est-à-dire l'incertitude : Les informations peuvent être vraies mais aussi fausses, et l'incertitude traduite peut être « résiduelle » (c'est-à-dire qu'elle est inhérente à un composant du système) ou « systémique » (c'est à dire qu'elle est induite par les relations entre les composants du système), et réductible ou irréductible. Exemples : des installations « censées » être imperméables, des autonomies estimées à x heures sans certitude, des degrés de criticité ou des zones d'impact incertains...

Notre sujet d'étude comporte donc de très nombreuses données imparfaites. Ainsi certaines données relatives à l'étude des réseaux et de leurs défaillances en cascade peuvent tout à la fois mêler incertitude, inconsistance et imprécision. Plusieurs techniques sont envisageables pour traiter ces imperfections, notamment la logique floue où les valeurs de vérité des variables - au lieu d'être « vrai » ou « faux » - sont des réels entre 0 et 1 ; les probabilités objectives (basées sur la fréquence ou des raisonnements logiques) et subjectives (relatives aux événements non répétitifs et aux évaluations subjectives des experts).

#### 5.2.1.4. Des données indisponibles

Ces données, nécessaires, nombreuses, diverses et incertaines sont toutefois souvent indisponibles ou inexistantes, et ce pour différentes raisons. Cela peut faire suite au manque de connaissances

« résiduelles », concernant les systèmes étudiés : les réseaux et infrastructures étudiés sont parfois mal connus et leur fonctionnement peut être assez imprévisible en tant de crise. Cela peut également faire suite au manque de connaissances « systémiques », concernant les relations et dépendances entre les systèmes étudiés : les (inter)dépendances entre les réseaux et infrastructures étudiés sont extrêmement complexes et parfois trop peu connues, et peuvent comporter de nombreuses zones d'ombre. Des questions d'organisation plus triviales peuvent également entraver la récolte des données, notamment la segmentation des connaissances entre les différents services d'un opérateur voire entre différents opérateurs, ou les turnovers importants qui peuvent entraîner des pertes de connaissances en chemin. La récolte de données correctes, certaines, complètes, consistantes et précises se révèle finalement très ardue. Mais différents moyens de collecte et rassemblement peuvent être utilisés pour tenter d'y parvenir.

#### 5.2.1.5. Des données dynamiques

L'aspect dynamique des réseaux techniques urbains et des infrastructures associées a pour conséquence une évolution continue des données relatives à leur fonctionnement. En effet, des travaux de rénovation, de protection, d'agrandissement, de densification, des réorganisations et de dispatching etc. peuvent avoir lieu et modifier le fonctionnement en réseau. Les données techniques nécessaires au renseignement de modèles fiables évoluent donc continuellement et les modèles doivent tenir compte de ce dynamisme pour rester valides.

### 5.2.2. Les moyens existants pour collecter les données auprès des acteurs

Grangeat (2017) identifie deux approches concernant l'acquisition des données nécessaires auprès des acteurs : l'approche explicite et l'approche implicite. L'approche explicite précise le fonctionnement interne de chaque réseau ou de chaque infrastructure (selon le niveau de granularité), à l'aide par exemple de simulateurs sectoriels. L'approche implicite décrit quant à elle les infrastructures comme une boîte noire, dont seuls les besoins en ressource sont connus. Il s'agit d'une approche basée principalement sur des données agrégées à l'échelle de l'infrastructure. Différents moyens sont envisageables pour collecter et rassembler des données lorsqu'elles ne sont pas directement disponibles. Ces moyens peuvent être empiriques, a posteriori, ou a priori et peuvent être collectifs ou individuels. L'analyse empirique de retours d'expérience à posteriori est présentée ci-dessous, ainsi qu'une méthodologie adaptée de l'Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets pour l'analyse des scénarios de cascade au sein des réseaux techniques urbains. Sont ensuite décrites différentes manières de récolter des données a priori auprès des gestionnaires de réseaux, brutes ou déjà traitées.

#### 5.2.2.1. Analyse de retours d'expérience

Le concept de retour d'expérience est décrit par un grand nombre de définitions, qui diffèrent selon les disciplines, les événements et les objets étudiés, les contextes politiques, organisationnels, techniques etc. Selon (Wybo, 2009) « le retour d'expérience s'applique à l'étude d'événements non voulus et de leur gestion. Il permet d'identifier en détail la genèse et l'évolution de l'événement dans ses diverses composantes (techniques, humaines, organisationnelles, environnementales) ; de déterminer l'ensemble des actions entreprises, négatives et positives ; de tirer des leçons en accédant à la connaissance tacite des personnes, de manière à construire des scénarios d'actions alternatives permettant de mieux gérer ces situations si elles se reproduisent ». Les REX s'inscrivent alors dans un processus d'amélioration continue, qui est illustré par la Figure 68 (Lhomme, 2012).

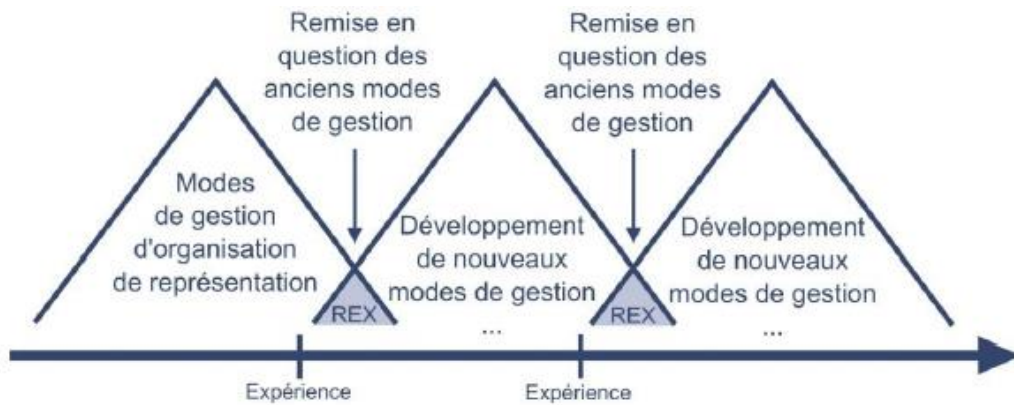


Figure 68 : Les REX, un processus d'amélioration continue. Source : (Lhomme, 2012)

Une analyse de nombreux rapports et articles portant sur des retours d'expérience de plusieurs inondations majeures (New York, La Nouvelle Orléans, Brisbane, Bangkok, Arles...) a été réalisée dans le cadre du projet de recherche RGC4 (Pottier et al., 2019). L'objectif était de reconstituer les défaillances des réseaux urbains dans toutes leurs dimensions et d'approfondir la connaissance des (inter)dépendances en étudiant notamment les causes, les conséquences, et les solutions palliatives. La méthodologie utilisée est présentée dans la Figure 69.

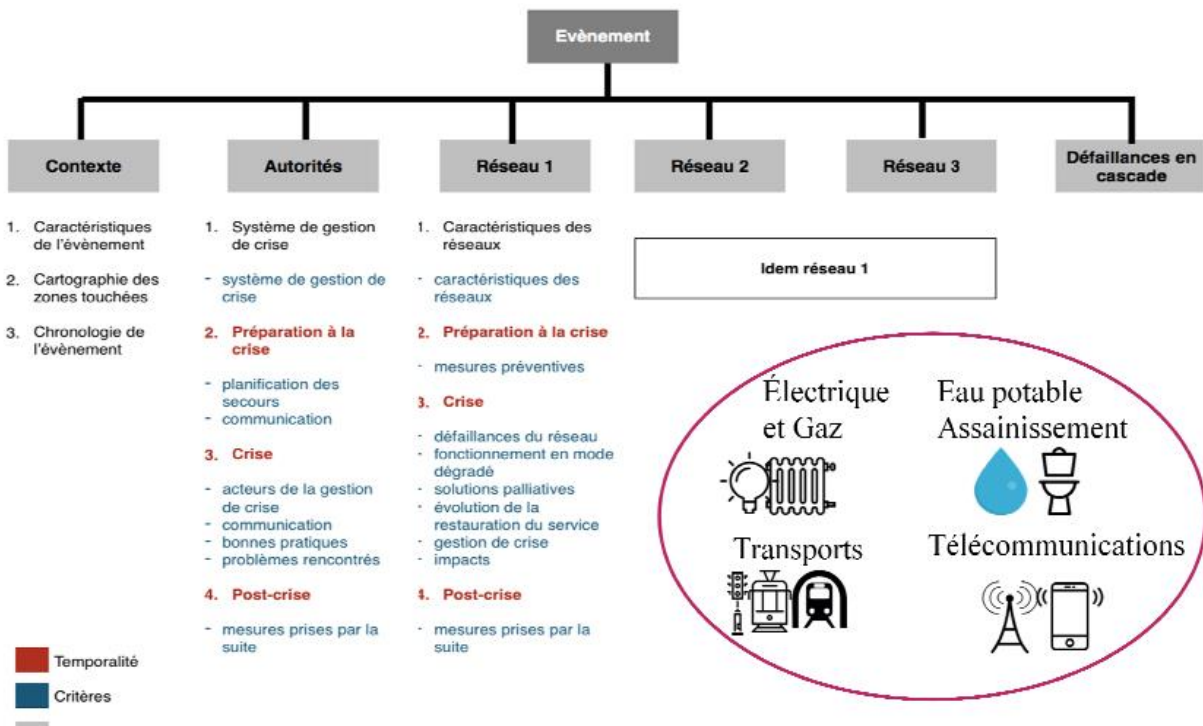


Figure 69 : Illustration de la démarche d'analyse des REX. Source : (Daniel, 2017b).

Les retours d'expérience existants étant très longs à lire et organisés de façon très hétérogène, une grille d'analyse centrée sur les réseaux a été créée pour organiser et synthétiser l'information. Cependant, les grilles d'analyses (illustrées par le

Tableau 25) n'ont pas pu être remplies totalement pour la plupart des cas d'étude car les informations sur les réseaux n'étaient pas présentes, pas assez détaillées ou trop hétérogènes (Daniel, 2017b). Par ailleurs un problème de fiabilité des données a également été rencontré, car les informations renseignées sont parfois non justifiées ou référencées.



Tableau 25 : Extrait de la grille d'analyse de REX, adapté de (Daniel, 2017)

| Réseau | Partie du réseau | Quantité impactée | Indicateur de dysfonctionnement | Effets combinés sur le service |
|--------|------------------|-------------------|---------------------------------|--------------------------------|
|        |                  |                   |                                 |                                |

Les retours d'expérience existants aujourd'hui sont donc de bons canaux pour le recueil d'informations et l'analyse des (inter)dépendances et défaillances en cascade des réseaux urbains, mais ne permettent pas dans leur forme actuelle une analyse fiable et globale. Il faudrait en effet que tous les REX prennent en compte la problématique des réseaux et infrastructures critiques, devenus une problématique majeure des travaux actuels. Il faudrait également que l'organisation de ces REX soit plus unifiée et plus homogène, pour permettre une meilleure analyse globale et comparative.

Une base de données, mise à jour quotidiennement et contenant plusieurs milliers d'événements au sein d'infrastructures critiques à travers le monde, a vu le jour en 2008 (Luijff et al., 2010). Cette base de données, basées sur les rapports empiriques des médias, est un moyen de déterminer des tendances. Comme introduits dans le chapitre 3, certains résultats d'analyse indiquent que peu de secteurs entraînent de cascade et que les (inter)dépendances ne sont pas souvent reportées par les médias.

#### 5.2.2.2. Application de l'AMDE pour l'analyse des REX

Le travail effectué par Daniel (2017) est ainsi une première étape vers l'adaptation des REX à l'étude des (inter)dépendances et défaillances en cascade des réseaux urbains, car il a permis la création d'une grille d'analyse commune et cohérente avec notre objet d'étude. Cependant, il ne répond pas exactement aux exigences de formalisation des démarches de modélisation des (inter)dépendances et des défaillances en cascade. Nous souhaitons ici aller plus loin dans la formalisation et la quantification, en s'appuyant notamment sur diverses sources d'informations comme les rapports de retours d'expérience globaux ou sectoriels, les articles de presse, des interviews d'experts voire même des résultats d'exercices et d'ateliers...

L'objectif est alors de trouver un format de synthèse et d'analyse des données contenues dans les REX (ou autres supports porteurs d'informations) compatible et pertinent pour traduire ces éléments avec une formalisation se rapprochant de l'AMDE mais adaptée aux enjeux de notre sujet. C'est pourquoi nous avons choisi de nous inspirer également du travail de Lhomme concernant sa méthode de génération de scénario de défaillances en cascade et de son Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets adaptée à l'étude des réseaux techniques (Lhomme, 2012). La grille d'analyse développée à cette occasion est reprise dans le Tableau 26.

Notre démarche (Bocquentin et al., 2018) s'inscrit dans la continuité de plusieurs travaux montrant l'intérêt des méthodes issues de la Sécurité de Fonctionnement pour l'étude de la résilience des systèmes techniques urbains (Bambara et al., 2015; Beraud, 2013; Michaël Gonzva, 2017; Lhomme, 2012; Vuillet et al., 2018). Nous étudions en particulier l'utilisation et l'adaptation de l'AMDE (Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets), en vue de construire d'abord un modèle fonctionnel intelligible par tous, susceptible ensuite de servir de base à des modèles plus quantitatifs, via l'établissement de règles. L'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE) permet notamment une analyse exhaustive et inductive des modes de défaillances potentiels d'un système (Mortureux, 2005; Vuillemeur, 1997). Elle considère ainsi chaque composant du système pour

identifier ses modes de défaillance, les recense de façon systématique, et tente d'évaluer leur criticité dans le cas d'une AMDEC (Kélada, 1994).

Tableau 26 : Extrait d'un tableau AMDE des défaillances des réseaux urbains, adapté de (Lhomme, 2012)

| Réseau | Composant | Fonction | Défaillance | Causes | Effets |
|--------|-----------|----------|-------------|--------|--------|
|        |           |          |             |        |        |
|        |           |          |             |        |        |

On sait que l'AMDE a été appliquée à différents domaines du génie civil depuis une quarantaine d'années (Talon et al., 2014), mais l'application aux réseaux urbains pose la question de leur structure en systèmes de systèmes complexes (Bambara et al., 2015). L'hypothèse faite par (Lhomme et al., 2011b) dans leur étude des effets dominos entre infrastructures critiques interdépendantes pour la construction de scénarios de défaillance est que l'on peut modéliser des scénarios de défaillances pour des systèmes de systèmes complexes si on utilise une combinaison de méthodes de la Sûreté de Fonctionnement en effectuant différentes analyses à différentes échelles. La première échelle correspond au système de systèmes où l'on étudie les dépendances entre les réseaux, la deuxième échelle correspond aux systèmes d'infrastructures où l'on modélise leurs relations fonctionnelles et le fonctionnement des réseaux, la troisième échelle correspond aux composants des infrastructures où l'on étudie leurs dépendances et les modes de défaillances. Le modèle développé est ainsi global, générique et simplifie parfois le fonctionnement complexe de ces sous-systèmes.

La méthode développée dans le cadre de la thèse de (Lhomme, 2012) - dans la continuité de (Lair, 2000; Serre et al., 2007) - pour la construction de scénarios de défaillances est alors basée sur la succession de trois étapes correspondant à trois outils :

- Une analyse fonctionnelle, pour déterminer les fonctions des systèmes et sous-systèmes urbains
- Une AMDE, pour identifier les modes de défaillances
- Des arbres d'événements, pour mettre en évidence les conséquences des pannes combinées.

Un modèle fonctionnel des villes impactées par des aléas naturels a également été proposé par (Bambara et al., 2015), avec une méthodologie comprenant quatre étapes :

- Une analyse fonctionnelle, où les fonctions des systèmes et sous-systèmes urbains sont déterminées
- Une AMDE, basée sur des retours d'expérience ou des événements actuels
- Une analyse par arbres d'événements, avec la représentation pour chaque composant des scénarios potentiels
- Un modèle à raisonnement qualitatif, avec des graphes causaux pour décrire les défaillances urbaines à partir des retours d'expériences.

On note également que des travaux plus récents ont démontré la pertinence de l'AMDE pour l'analyse des modes de défaillances de systèmes techniques urbains particuliers, comme les systèmes de transports guidés, en considérant un à un les composants du système complexe et en permettant de structurer les informations (Gonzva, 2017). Ces travaux reprennent d'ailleurs l'utilisation de graphes causaux pour représenter les résultats de l'AMDE. Cette formalisation serait alors susceptible de constituer à la fois un langage commun pour les acteurs concernés et une base pour la construction de modèles permettant de produire des simulations apportant des éléments nouveaux pour la

planification et la gestion de crise. Nous avons donc envisagé de conserver le principe des échelles techniques présentées – services, infrastructures et composants - (Lhomme et al., 2011b) en adaptant toutefois l'enchaînement des étapes à notre objectif.

Nous proposons une méthode dont la première étape est l'analyse des REX existants et leur formalisation sous un format compatible avec les exigences d'une AMDE. La deuxième étape est l'application de l'AMDE aux connaissances collectées. La troisième étape est l'établissement de règles fonctionnelles, pour ensuite les utiliser au sein d'outils d'analyse des (inter)dépendances et de défaillances en cascade lors de la quatrième étape. La méthodologie proposée est schématisée par la Figure 70 ci-dessous.

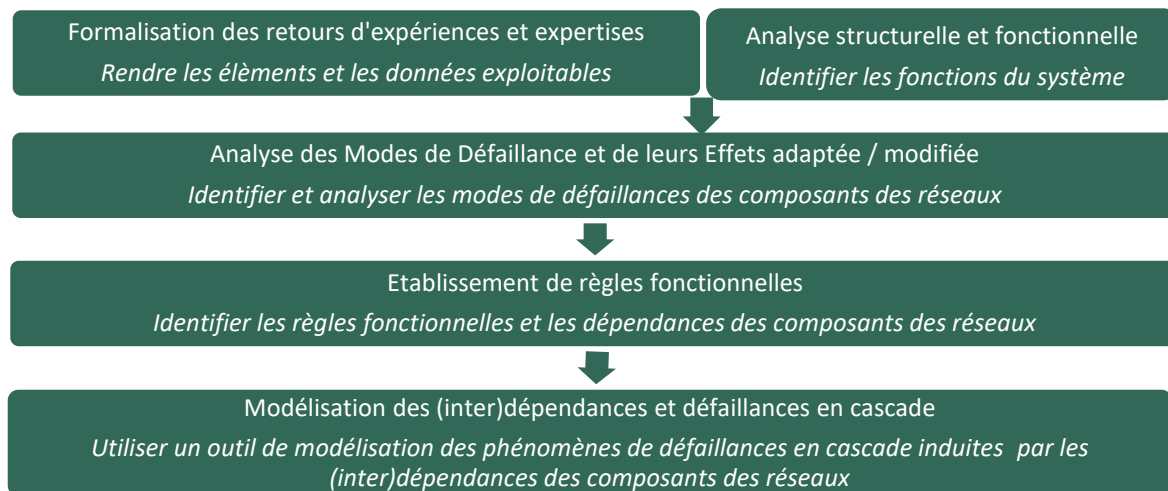


Figure 70 : Schéma de l'approche envisagée. Source : (Bocquentin et al., 2018).

La question de la spatialisation des informations est un des enjeux principaux de la question des (inter)dépendances entre les réseaux urbains et leurs infrastructures, notamment pour pouvoir déterminer les impacts en chaîne mais aussi l'emprise des effets des défaillances. Le niveau de complexité du système urbain et des systèmes des réseaux est également un des fondements de cette question, qui complique singulièrement la tâche de l'identification et de modélisation des phénomènes. Et l'on peut se demander si l'AMDE, utilisée initialement dans des domaines industriels où chaque composant d'un système technique fini peut être décomposé, est un outil pertinent pour l'analyse de phénomènes si complexes, nombreux, divers et dont nous ne possédons pas toutes les caractéristiques.

Nous avons donc tenté de proposer une formalisation qui pourrait potentiellement répondre à ces enjeux, à partir des deux formats présentés plus haut, et qui serait adaptée au sujet spécifique de la modélisation des défaillances en cascade. Nous reprenons ci-dessous les intitulés et contenus des différentes colonnes en partant de la gauche et en allant vers la droite, comme montré dans le Tableau 27.

- Les trois premières colonnes, « Service », « Réseau et sous-réseau » et « Composant », reprennent la décomposition des services et réseaux proposée au chapitre 1 : service, réseau, sous-réseau, composant.

On note qu'une colonne portant sur le type d'implantation (surfacique, ponctuelle, linéaire) pourrait également donner des indications supplémentaires potentiellement intéressantes.

- « Quantité impactée » : Cette colonne permet d'indiquer le nombre de composants touchés par cette défaillance, pour aider à quantifier l'impact provoqué si on le compare ensuite au nombre total de composants de ce type.
- « Zones et Zones bis » : Ces colonnes peuvent indiquer la ou les zones géographiques où le ou les composants ont été défaillants, puis la ou les zones géographiques où les effets possibles pourraient survenir.

La suppression de la colonne habituelle « Fonction » a été expérimentée, dans un souci de simplification de l'étude. Celle-ci semble en effet complexe et peu pertinente lors de l'analyse de REX et n'apparaît pas comme porteuse d'éléments majeurs dans la modélisation des phénomènes de défaillances en cascade.

- « Causes possibles (s) » : Nous indiquons dans cette colonne les causes possibles de la défaillance (au sens de l'AMDE).

NB : Nous indiquons par (s) le service relatif à la cause ou à l'effet s'il est différent du service dont fait partie le composant étudié.

- « Quantité concernée » : Cette colonne peut indiquer le nombre de composants concernés par la cause de défaillance identifiée, pour aider à quantifier celles-ci.
- « Défaillance » : Cette colonne indique l'intitulé et la description de la défaillance étudiée.
- « Effets possibles (s) » : Nous indiquons dans cette colonne les effets possibles identifiés de la défaillance étudiée (au sens de l'AMDE).
- « Quantité concernée bis » : Cette colonne peut indiquer le nombre de composants à l'origine de l'effet identifié, pour aider à quantifier ceux-ci.
- « Sources » : La colonne « Sources » permet finalement d'indiquer les sources d'informations utilisées pour arriver à ces conclusions, afin de retracer si besoin les chemins de la réflexion.

La formalisation sous forme de tableau est directement présentée à travers une expérimentation d'application qui suit, synthétisée dans le Tableau 27. Nous présentons ici un extrait de l'analyse réalisée pour le cas du passage de l'ouragan Sandy à New York en octobre 2012.

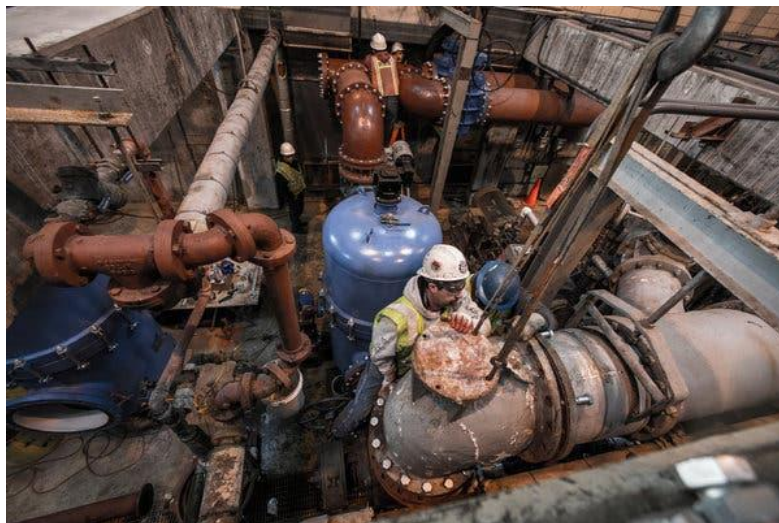


Figure 71 : Les pompes de la station d'épuration de Bay Park, à East Rockaway dans le comté de Naussau, ont dû être remplacées après avoir été inondée durant la tempête. Source : (Schwartz, 2013).

Le Tableau 27 ci-dessous présente les résultats de l'application de l'AMDE adaptée, avec le formalisme proposé plus haut, pour certains composants du réseau d'assainissement de la ville de New York. Les cases ont été remplies grâce au travail de (Daniel, 2017b) sur les retours d'expériences et diverses sources bibliographiques complémentaires. On note que l'ampleur de cet aléa, et sa complexité, entraîne la multiplication des événements initiateurs auxquels sont confrontés les différents composants des services et réseaux techniques.

Cette application permet alors de combiner plusieurs sources d'informations hétéroclites, d'organiser les informations de façon à pouvoir les traiter facilement, de mettre en avant et de rendre lisible plusieurs phénomènes tels que les différents liens de cause à effets pour les défaillances des composants du réseau d'assainissement de la ville de New York, en introduisant des éléments quantitatifs. Certains éléments identifiés nous semblent intéressants à mentionner ici : le phénomène important de rejets d'eaux dont le traitement partiel a été choisi et préféré selon l'urgence, les coupures souvent préventives de courant mais parfois subies qui ne sont pas la première cause de défaillance des stations d'épuration contrairement à ce qu'on pourrait croire, l'importance majeure des dégâts structurels sur les installations, l'enchaînement d'étapes critiques dans le cycle de collecte et de transport pouvant à chaque fois aboutir à la coupure du processus d'assainissement.

Cette analyse pourrait être complétée par des interviews avec des experts et des opérationnels impliqués dans la gestion de crise et la planification à l'époque, en utilisant ce même support formalisé commun de discussion pour les faire réagir et les faire compléter les différentes catégories d'informations.

Tableau 27 : Extrait de l'application de l'AMDE adaptée pour le cas du réseau d'assainissement de la ville de New York durant l'ouragan Sandy en 2012 aux Etats-Unis.  
Source : (Bocquentin et al., 2018)

| Service | Réseau et sous-réseau       | Composant           | Quantité impactée | Zones                              | Causes possibles (s)              | Quantité concernée | Défaillance   | Effets possibles (s)                               | Quantité concernée bis | Zones bis                      | Sources   |
|---------|-----------------------------|---------------------|-------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|---|--|------------------------|--------------------------------|---|
| Eau     | Assainissement - Collecte   | Avaloir             | -                 | Zones inondées                     | Obstruction                       | -                  | L'avaloir n'assure plus la collecte des eaux usées                | Inondation d'eaux pluviales et fluviales / marines | -                      | Zones inondées et voisines     | (Daniel, 2017b; FEMA, 2013; Kenward et al., 2013; McAllister, 2014) |
|         |                             |                     |                   |                                    | Sollicitations physiques          | -                  |   | Endommagement de l'avaloir                         | -                      | Composant                      |   |
| Eau     | Assainissement - Collecte   | Canalisation        | -                 | Zones inondées et voisines         | Sous-dimensionnement              | -                  | La canalisation n'assure plus le transport des eaux usées         | Inondation d'eaux usées                            | -                      | Zones traversées par le réseau |   |
|         |                             |                     |                   |                                    | Sollicitations physiques          | -                  |   | Endommagement de la canalisation                   | -                      | Composant                      |   |
|         |                             |                     |                   |                                    | Obstruction                       | -                  |   | Coupure du cycle de transport                      | -                      |                                |   |
| Eau     | Assainissement - Collecte   | Station de relevage | 42 / 96           | Zones inondées et voisines         | Sollicitations physiques          | -                  | La station de relevage n'assure plus le relèvement des eaux usées | Inondation d'eaux usées                            | >31                    |                                |   |
|         |                             |                     |                   |                                    | Submersion                        | -                  |   | Endommagement de la station de relevage            | 42                     |                                |   |
|         |                             |                     |                   | Zones sans alimentation électrique | Coupure d'alimentation électrique | -                  |   | Coupure du cycle de transport                      | -                      | Composant                      |   |
| Eau     | Assainissement - Traitement | Canalisation        | -                 | Zones inondées et voisines         | Sous-dimensionnement              | -                  | La canalisation n'assure plus le transport des eaux usées         | Inondation d'eaux usées                            | -                      | Zones traversées par le réseau |   |
|         |                             |                     |                   |                                    | Sollicitations physiques          | -                  |   | Endommagement de la canalisation                   | -                      | Composant                      |   |
|         |                             |                     |                   |                                    | Obstruction                       | -                  |   | Coupure du cycle de traitement                     | -                      |                                |   |
| Eau     | Assainissement - Traitement | Station d'épuration | 13 / 14           | Rockaway Coney Island North River  | Sous-dimensionnement              | 13                 | La station d'épuration n'assure plus le traitement des eaux usées | Rejet d'eaux usées non traitées                    | 9                      | Milieu naturel et urbain       |   |
|         |                             |                     |                   |                                    | Sollicitations physiques          | 13                 |   | Rejet d'eaux usées partiellement traitées          | 6                      | Milieu naturel et urbain       |   |
|         |                             |                     |                   |                                    | Submersion                        | 9                  |   | Endommagement de la station d'épuration            | 13                     | Composant                      |   |
|         |                             |                     |                   |                                    | Coupure d'alimentation électrique | 6                  |   |  |                        |                                |   |

Plusieurs observations et pistes de réflexions nous apparaissent intéressantes à discuter ici concernant les apports potentiels et les limites de l'application de l'AMDE à l'étude des (inter)dépendances et des défaillances en cascade entre les infrastructures et réseaux techniques urbains, par le biais de retours d'expériences.

Tout d'abord, on note que malgré plusieurs tentatives d'adapter certaines formes d'analyse fonctionnelle aux problématiques du génie urbain, ces travaux sont souvent restés au stade exploratoire. Il semble que la complexité du système urbain est une des principales limites, car le niveau de complexité d'une ville ou d'un quartier est beaucoup plus élevé que celui d'un composant ou système industriel donné et l'exhaustivité semble très difficile. La nécessité de fixer une granularité de l'étude qui rende possible techniquement l'analyse apparaît rapidement, et a d'ailleurs été introduite dans certains travaux (Gonzva, Balsells, & Barroca, 2015; Gonzva, 2017) où le niveau « méso » correspondant aux composants du système étudié – qui était ici un quartier – a été défini comme pertinent, mais ensuite réduit à une échelle urbaine plus locale. Le quartier est en fait étudié plutôt comme un système « imbriquant », en relation avec le système « imbriqué » de transport guidé au cœur de l'étude. Et Gonzva de conclure, comme (Lhomme, 2012) avant lui, que la complexité et l'imbrication des sous-systèmes composant le système urbain rendent la modélisation de scénarios de défaillances en cascade très ardue, et qu'il semble nécessaire de combiner différentes méthodes complexes.

Par ailleurs, il s'avère que l'apport des REX dans la modélisation des effets en cascade est limité par la diversité des contextes urbains. Un scénario de défaillances ou dysfonctionnements en cascade observé dans un certain contexte ne peut pas être considéré comme plausible dans un autre contexte sans études complémentaires. On peut citer comme exemple le cas de la dépendance générique du réseau de métro au réseau de distribution électrique, qui s'avère inexistant pour la plupart des infrastructures du métro parisien car l'opérateur RATP a choisi de se raccorder directement au réseau de haute tension géré par RTE. Des cas de cascade concernant ce lien de dépendance dans des villes telles que New York ou La Nouvelle Orléans ne peuvent donc pas être transposés sur le cas d'étude parisien. On réalise finalement que les contextes organisationnels, techniques, géographiques sont très divers selon les pays et selon les villes, et cela rend les travaux globaux et génériques sur les systèmes urbains très ardu.

Concernant les scénarios de défaillances en cascade au sein des villes concernées, il semble que l'analyse fonctionnelle combinée à des résultats de REX ne permette pas d'introduire de nouveaux éléments à l'analyse fonctionnelle systématique mais elle pourrait potentiellement permettre de retirer ou de préciser certains éléments et certains liens fonctionnels génériques. Elle a cependant le mérite de rendre possible et assez aisée la combinaison, la lecture, l'analyse, et un début de quantification des retours d'expériences concernant les phénomènes de défaillances en cascade de réseaux urbains. Et les résultats obtenus pourraient potentiellement apporter une aide pour la construction de scénarios pour le cas francilien, pour lequel la Zone de Défense et de Sécurité ne semble pas posséder d'éléments formalisés pour l'instant. Par exemple, on peut espérer que de telles analyses sur les retours d'expériences de l'ouragan Sandy aux Etats-Unis pourraient offrir des éléments de quantification, des points de vigilance, des séquences de scénarios pour les exercices et simulations à venir.

La question de la compatibilité des règles et des séquences de scénarios identifiées par ce biais avec les méthodes de modélisation et de simulation des défaillances en cascade utilisées par ailleurs se pose alors, et sera à étudier plus finement par la suite.

### 5.2.2.3. Collecte de données auprès des opérateurs

Diverses méthodes ont pu être identifiées pour le recensement, la collecte et l'obtention de données concernant les phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade auprès des opérateurs de réseaux. Les moyens présentés ici concernent tout d'abord la collecte de données sectorielles réalisée de façon indépendante auprès des différents acteurs.

#### Questionnaires et formulaires

Il est possible de récolter de l'information auprès des opérateurs - ou auprès des experts - grâce à des entretiens et des questionnaires dédiés. Ces grilles, et les informations d'expertise renseignées en leur sein, doivent alors être compatibles avec leur utilisation future dans le cadre de la mise en commun multi-réseaux. La Figure 72 présente la grille de recueil d'informations pour le diagnostic des dépendances à différentes ressources externes et internes du système RATP (opérateur de transports en communs parisien) (Toubin, 2014). Cette grille permet notamment de renseigner sur les délais de remise en service après la coupure de ces ressources, les niveaux de fiabilité de celles-ci et la criticité de l'approvisionnement.

|                      |                            | DIAGNOSTIC                                |           |                    |                                    | EVALUATION                |                           |                |
|----------------------|----------------------------|---|-----------|--------------------|------------------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------|
| Ressources utilisées |                            | Préciser (nature, quantité, localisation) | Autonomie | Fournisseur        | Délai de remise en service système | Fiabilité de la ressource | Criticité pour le système |                |
| Internes             | personnel                  |   |           |                    |                                    |                           |                           |                |
|                      | biens                      |   |           |                    |                                    |                           |                           |                |
|                      | infrastructures            |   |           |                    |                                    |                           |                           |                |
|                      | financières                |   |           |                    |                                    |                           |                           |                |
|                      | données réseau TIC interne |   |           |                    |                                    |                           |                           |                |
| Externes             | matière                    |   |           |                    |                                    |                           |                           |                |
|                      | infrastructures            | maintenance                               |           | plusieurs semaines | multiples                          | quelques jours            | inconnu                   | indispensable  |
|                      | énergie                    | routes                                    |           | <12h               | collectivités locales              | immédiat                  | pas du tout fiable        | indispensable  |
|                      |                            | transfo locaux                            |           | aucune             | ErDF                               | <12h                      | peu fiable                | indispensable  |
|                      | eau                        |   |           | aucune             | Eau de Paris, autres syndicats     |                           |                           | négligeable    |
|                      | réseau TIC                 | téléphone, internet                       |           | <12h               | FT, opérateurs mobiles             | immédiat                  | plutôt fiable             | peu importante |
|                      | service                    | assainissement                            |           | <12h               | SIAAP, autres syndicats            | immédiat                  | peu fiable                | peu importante |
| alimentation         |                            |   | <12h      | restaurateurs      | immédiat                           | plutôt fiable             | peu importante            |                |
| transport            |                            |   | <12h      | SNCF, Optile       | immédiat                           | peu fiable                | importante                |                |

|                      |                             | DIAGNOSTIC   |         |             |                                       | EVALUATION                 |                              |                           |  |
|----------------------|-----------------------------|--------------|---------|-------------|---------------------------------------|----------------------------|------------------------------|---------------------------|--|
| Ressources fournies  | Quantité (préciser l'unité) | Localisation | Inertie | Utilisateur | Délai de remise en service production | Fiabilité de la production | Criticité pour l'utilisateur | Utilisateurs prioritaires |  |
| service de transport | 3 millions de voyageurs /j  |              | <12h    | voyageurs   | immédiat                              | plutôt fiable              | indispensable                |                           |  |

Figure 72: Portrait sectoriel du système RATP ferré face à un risque d'inondation modéré. Source : (Toubin, 2014).

La Figure 73 représente quant à elle les formulaires utilisés par la démarche CISIA (Panzieri, 2012) pour caractériser une infrastructure ou une entité. A l'aide de codes faisant référence à différentes réponses possibles, la personne qui renseigne ces formulaires spécifie si et comment l'infrastructure étudiée est dépendante de ressources entrantes, et si et comment l'infrastructure produit, transporte ou transforme des ressources à son tour.



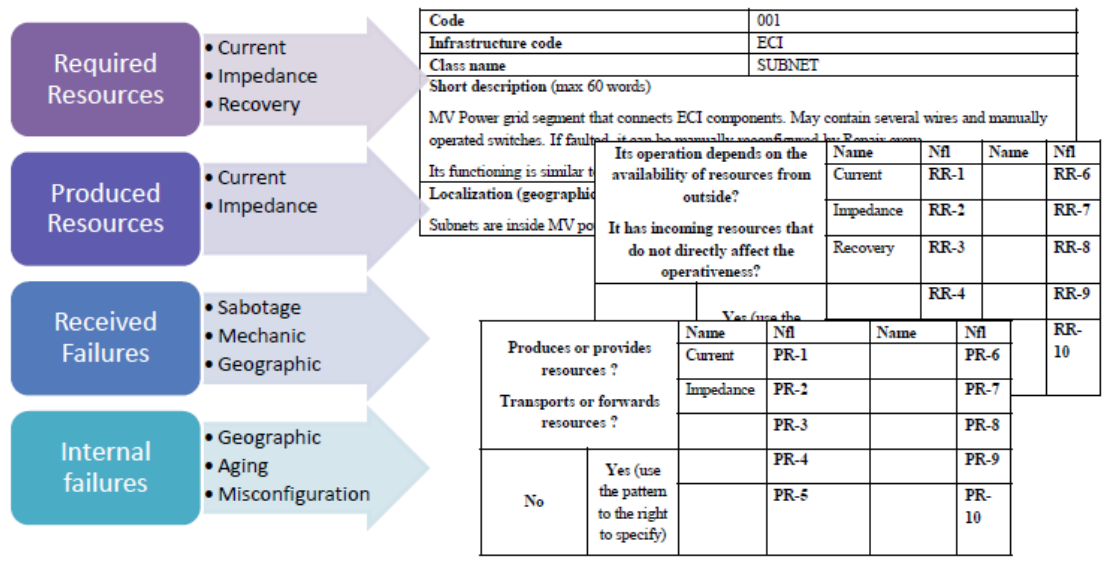


Figure 73 : Questionnaires utilisés pour décrire une entité / infrastructure dans l’outil CISIA. Source : (Panzieri, 2012)

**Simulateurs sectoriels – Modèles physiques**

Il est également envisageable de récupérer de l’information en sortie des différents simulateurs sectoriels existants, notamment lorsqu’ils sont déjà utilisés par les gestionnaires de réseaux du secteur correspondant. Ces outils peuvent être assez variés mais ont en commun la volonté de modéliser le comportement d’un réseau particulier. Quelques exemples représentatifs sont explicités ci-dessous. OpenTrack est un outil de simulation interactive de la gestion des réseaux ferroviaires développé par l’ETH Zurich, qui est assez répandu parmi les gestionnaires, industriels et chercheurs du secteur. Le principe de simulation est décortiqué (entrées/simulation/sorties) et illustré de façon schématique ci-dessous par la Figure 74.

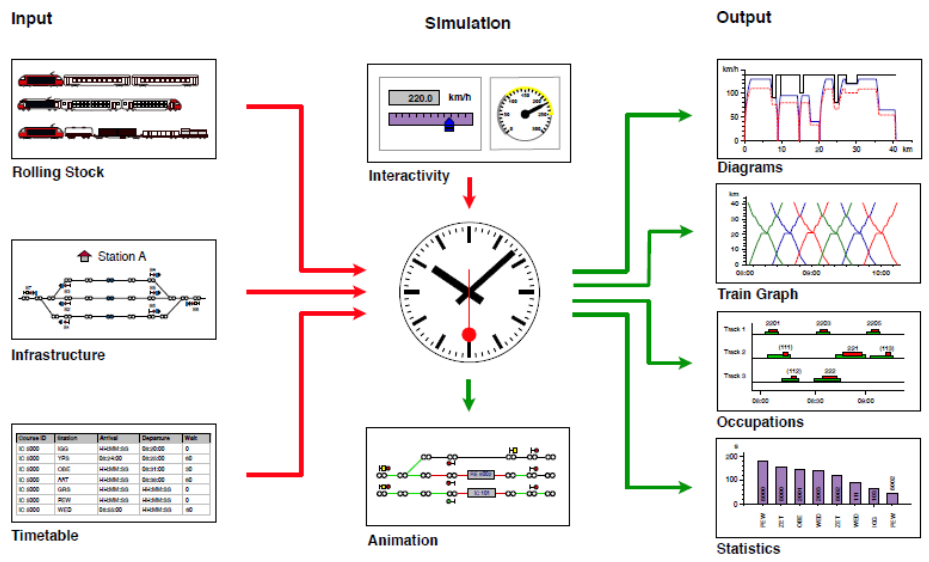


Figure 74 : Les modules de la simulation proposée par l’outil OpenTrack. Source : (IVT, 2017).

L’outil PSS®SINCAL est quant à lui un simulateur de réseaux électriques de toute sorte développé par Siemens et comportant de nombreux modules, représentés ci-dessous par la Figure 75, qui se concentrent sur différentes problématiques.

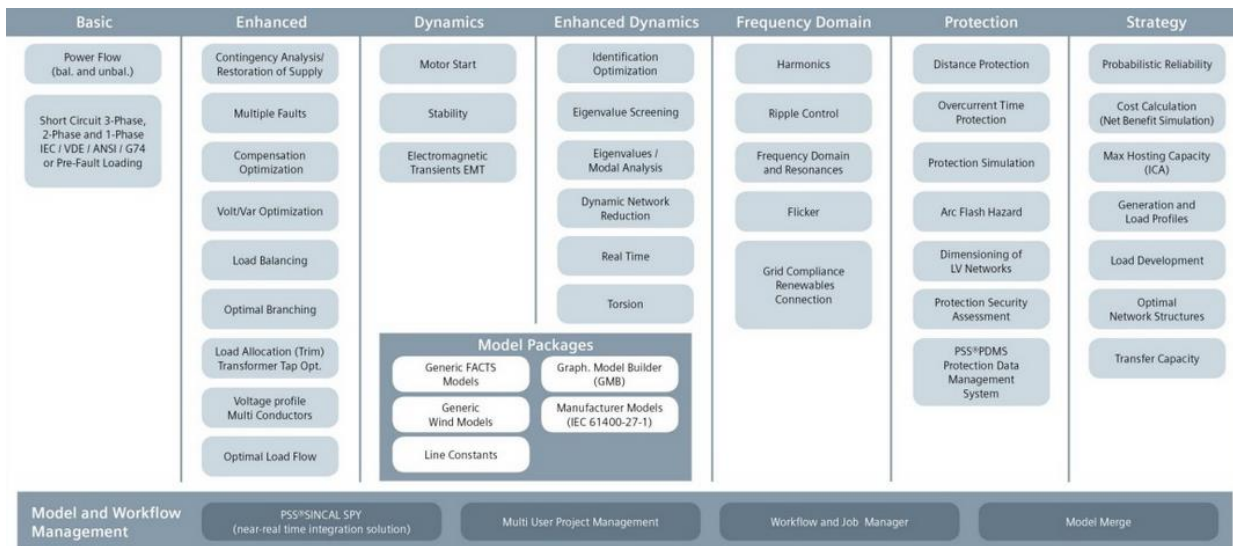


Figure 75 : Les modules existants pour l'outil de simulation PSS®SINCAL. Source : <https://new.siemens.com>.

Les données obtenues en sortie de ces simulateurs peuvent être de différentes natures et formes, et peuvent être utilisées de différentes façons. Grangeat (2017) proposait par exemple d'utiliser de façon hybride les simulateurs sectoriels ou l'expertise des gestionnaires de réseau pour leur faire construire des zones d'impacts selon des scénarios donnés, afin de partager ces zones aux autres opérateurs qui les utiliseront alors en tant que données d'entrées pour construire à leur tour une nouvelle zone d'impact comme schématisé dans la Figure 76.

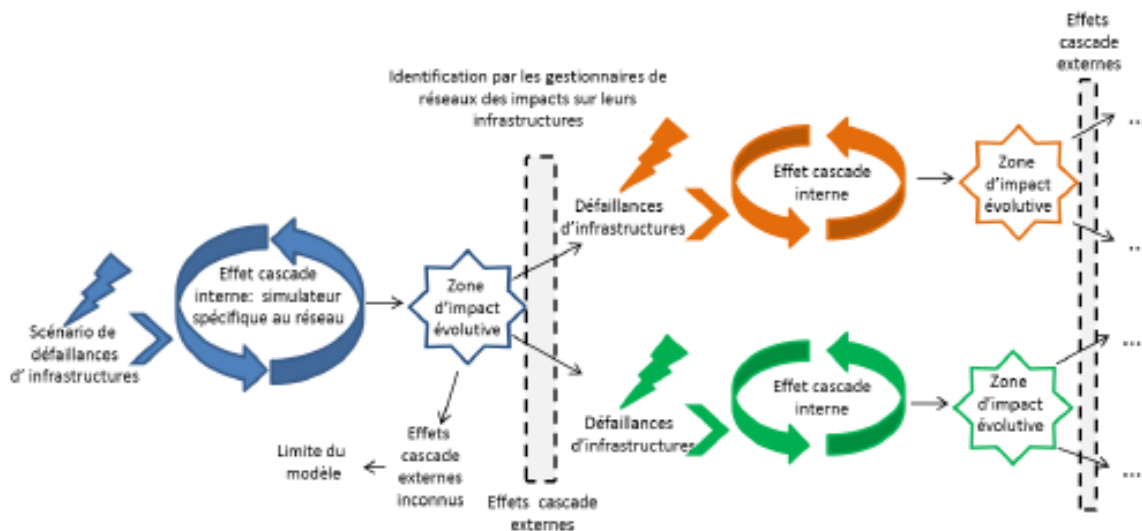


Figure 76 : Schéma des enchaînements entre les effets cascade internes pour un réseau, la construction de zones d'impacts, et les effets cascades externes pour d'autres réseaux. Source : (Grangeat, 2017).

#### 5.2.2.4. Collecte de données à travers des initiatives communes

Les moyens présentés ici regroupent des initiatives collaboratives pour l'analyse et la production de données techniques et organisationnelles. Ces analyses collaboratives permettent les traitements en commun de données sectorielles mais aussi intersectorielles, en prenant notamment en compte les liens de dépendances existants entre les réseaux.

## Ateliers collaboratifs

Les approches collaboratives ont pour objectif de structurer un problème complexe de manière transparente afin d'améliorer la compréhension mutuelle des parties prenantes et d'arriver à un consensus (Mustajoki et al., 2004). Les ateliers collaboratifs, où différents acteurs concernés par une problématique particulière se retrouvent autour d'une table pour y travailler, peuvent alors permettre d'effectuer des analyses communes préalables au renseignement d'une démarche multisectorielle.

On peut citer pour exemple les ateliers organisés par le programme de recherche EURIDICE en partenariat avec le Secrétariat Général de la Zone de Défense et de Sécurité de Paris, dans le cadre de la préparation à la gestion d'une crue majeure de la Seine. L'outil a été utilisé pour le recueil des informations concernant des interactions et dépendances évoquées lors d'ateliers avec des gestionnaires de réseaux et des parties prenantes associées. Une visualisation des représentations proposées par la table graphique est reprise dans la Figure 77. On y observe les liens de dépendances, de niveau macro, identifiés entre les différents secteurs et services.

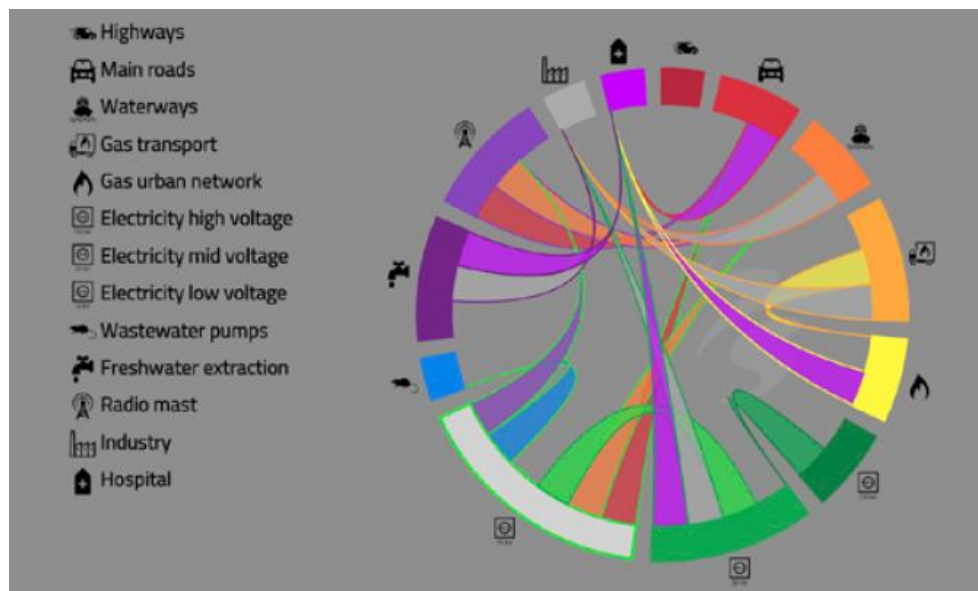


Figure 77: Représentation graphique des relations de dépendances au sein des réseaux urbains par l'outil Circle. (Deltares, 2018)

## Plateformes d'échanges

Les parties prenantes peuvent également avoir recours à des plateformes d'échanges d'informations spécifiques à une problématique. Ces plateformes, souvent en ligne, permettent le dépôt et le retrait sécurisé de fichiers par les différents acteurs.

Un exemple de ce type d'échanges est la plateforme Alfresco portée par la DRIEA dans le cadre de la Déclaration d'Intention du 20 mars 2016, qui rassemble les parties prenantes franciliennes autour de la question des vulnérabilités face à l'inondation. Cette plateforme encourage et permet l'échange de cartographies entre les différents signataires, représentant notamment les zones de vulnérabilités des différents réseaux face aux différents scénarios de crue. Une illustration du fonctionnement de cette plateforme est présentée dans la Figure 78.

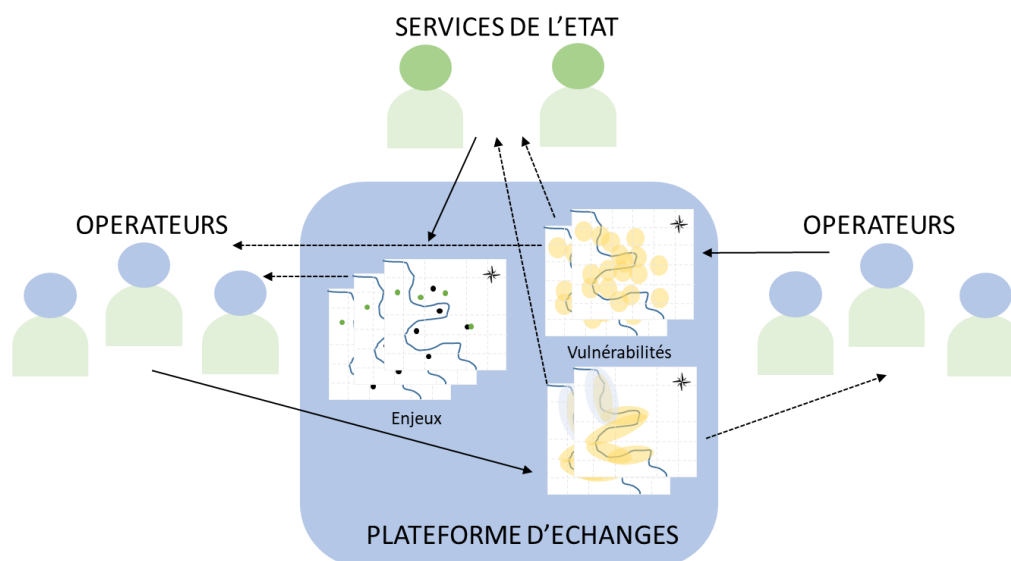


Figure 78 : Fonctionnement de la plateforme d'échanges d'informations Alfresco.

## Exercices

Les exercices de mise en situation et de gestion de crise sont des moyens d'améliorer la formation concernant l'anticipation et la gestion des situations d'urgence (Limousin, 2017). Ces exercices permettent de s'assurer que les dispositifs prévus sont opérationnels et qu'ils sont en mesure de faire face à la crise. Ils permettent également, lorsque l'exercice est joué par différents acteurs et organisations, la mise en commun et la centralisation d'informations spécifiques au scénario. Cela peut alors faire apparaître une incohérence, une dépendance ou une approximation à creuser.

L'exemple de l'exercice de simulation d'une crue de la Seine dans le XVème arrondissement de Paris est ici utilisé pour illustrer les propos (*Exercice Sequana 15 | La Préfecture et Les Services de l'État En Région Île-de-France*, n.d.). Cet exercice nommé Sequana 15/18 a eu lieu en décembre 2018 (faisant suite à l'exercice Sequana de plus grande envergure de 2016) et a regroupé différents acteurs et gestionnaires de réseaux. La grille utilisée pour construire le scénario de l'exercice est présentée dans le Tableau 28. Afin de faciliter et d'optimiser le recueil d'informations concernant les liens de dépendances entre les réseaux, nous proposons une nouvelle grille dans le Tableau 29. Cette nouvelle grille permet l'introduction d'estimations chiffrées des impacts, et des actions mises en place. L'instauration d'un code couleur de surbrillance est proposée (vert = certitude forte, jaune = certitude faible, transparent = pas d'indication). La réorganisation des colonnes du chronogramme est également proposée, avec la description des messages dans les colonnes « objet » et « input », et les descriptions des actions prises par l'émetteur du message dans la colonne renommée « actions mises en place ». Une autre colonne intitulée « réactions attendues », comprenant des informations sur les actions prévues des acteurs non joueurs à la suite des inputs décrits, est ajoutée. Une nouvelle colonne « cause », dans laquelle les joueurs devront indiquer la cause de leur action ou de leur communication (ex : titre de l'input, action d'un autre opérateur, hauteur d'eau mesurée...) est aussi proposée.

Les liens de cause à effet, pouvant traduire une dépendance et une cascade d'événements, sont ainsi plus facilement reconnaissables pour le renseignement d'éventuels modèles. La prise en compte et la différenciation des actions des joueurs et de celles des acteurs non joueurs (qui tiendraient un rôle en cas de crise mais qui ne participent à l'exercice tel quel) est également facilitée.

Tableau 28 : Grille de scénario utilisée lors de l'exercice Sequana 15/18. Source : (Zone de Défense, 2019).

| TEMPS DE JEU | HEURE REELLE | HAUTEUR AUSTERLITZ (CM) | CODE             |                   | MOYEN DE TRANSMISSION DE L'INPUT | OBJET        | INPUT                        | REACTION ATTENDUE |
|--------------|--------------|-------------------------|------------------|-------------------|----------------------------------|--------------|------------------------------|-------------------|
|              |              |                         | SERVICE EMETTEUR | SERVICE RECEPTEUR |                                  |              |                              |                   |
| XX/XX/XX     | YY :YY       | ZZZ                     | SPC              | Tous              | Crisorsec                        | Bulletin SPC | Prévision de montée des eaux |                   |

Tableau 29 : Grille de scénario proposée pour optimiser le recueil d'informations concernant les liens de dépendances et les cascades d'événements.

| TEMPS DE JEU | HEURE REELLE | HAUTEUR AUSTERLITZ (CM) | CODE             |                   | MOYEN DE TRANSMISSION DE L'INPUT | CAUSE                             | OBJET               | INPUT  | ACTIONS MISES EN PLACE                 | REACTION ATTENDUE                                       |
|--------------|--------------|-------------------------|------------------|-------------------|----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|--|--|---|
|              |              |                         | SERVICE EMETTEUR | SERVICE RECEPTEUR |                                  |                                   |                     |  |  |   |
| XX/XX/XX     | YY :YY       | ZZZ                     | SPC              | Tous              | Crisorsec                        | Nouvelle estimation               | Bulletin SPC        | Prévision de montée des eaux jusqu'à hauteur H | Actions mises en place par le joueur 1 | Actions prévues par les acteurs non joueurs en réaction |
| XX/XX/XX     | YY :YY       | ZZZ                     | Joueur 2         | Tous              | Crisorsec                        | Hauteur d'eau H prévue            | Type d'informations | Titre et description                           | Actions mises en place par le joueur 2 | Actions prévues par les acteurs non joueurs en réaction |
| XX/XX/XX     | YY :YY       | ZZZ                     | Acteur 1         | Joueur 2          | Appel                            | Actions mise en place le joueur 2 | Type d'informations | Titre et description                           | Actions mises en place par l'acteur 1  |   |

## 5.3. UNE GRANULARITE (ET UNE COMPLEXITE) A ADAPTER AU CONTEXTE ET A L'ECHELLE

### 5.3.1. Le concept de granularité

L'état de l'art des démarches existantes ou en cours de développement nous a amené à réaliser que le choix des échelles (spatiale, organisationnelle, temporelle, technique qui entretiennent des relations complexes entre elles) était un des critères déterminants pour la mise en place d'une démarche. Les travaux de Toubin (2014) sur la résilience des réseaux parisiens et la collaboration entre les opérateurs de service ont également discuté de la nécessité de prendre en compte l'emboîtement des diverses échelles spatiales, allant de l'échelle du territoire à celle du composant. On définira ici par le terme « échelles spatiales » les différentes catégories de périmètres géographiques correspondant aux zones étudiées. On peut identifier plusieurs échelles distinctes comme l'agglomération, la ville, le quartier, l'îlot, voire l'infrastructure. On définira en revanche par « granularité » le niveau de détails (ou la finesse) de l'analyse, correspondant notamment aux types d'objets considérés dans la zone d'étude. Les différents niveaux de granularité possibles pour la décomposition des réseaux techniques urbains sont principalement les suivants, même si des niveaux complémentaires ou intermédiaires peuvent également être définis :

- Le niveau correspondant aux réseaux techniques urbains (électricité, assainissement, chauffage urbain, etc.)
- Le niveau correspondant aux infrastructures (poste source, usine d'assainissement, centrale géothermique, etc.)
- Le niveau correspondant aux composants (transformateur, pompe, échangeur, etc.)

Ces différents niveaux sont illustrés dans la Figure 79. Des relations de dépendances y sont également représentées, pour illustrer la diversité de celles-ci. En effet, une infrastructure donnée peut être dépendante d'un de ses composants, ou d'un composant externe, ou d'une autre infrastructure appartenant au même réseau, et ainsi de suite.

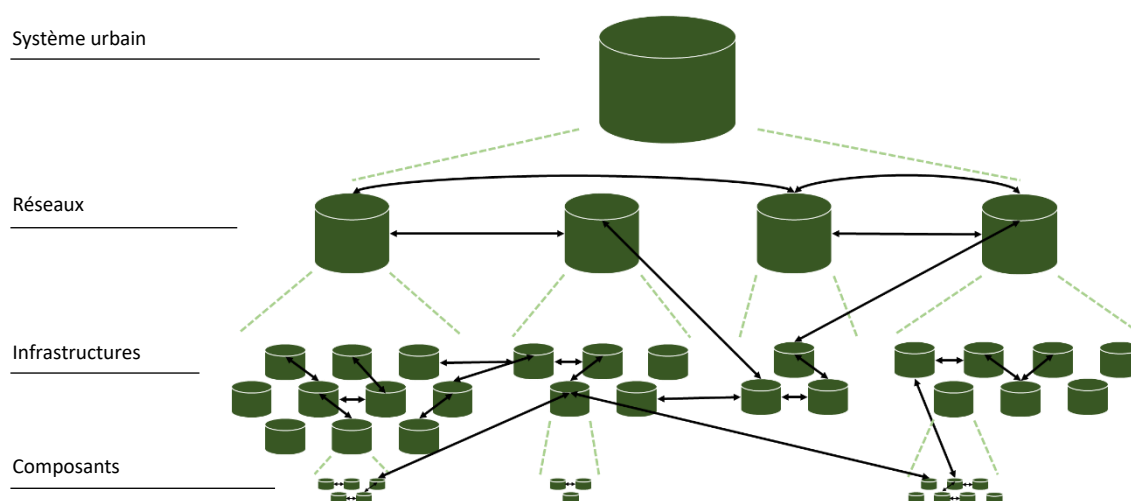
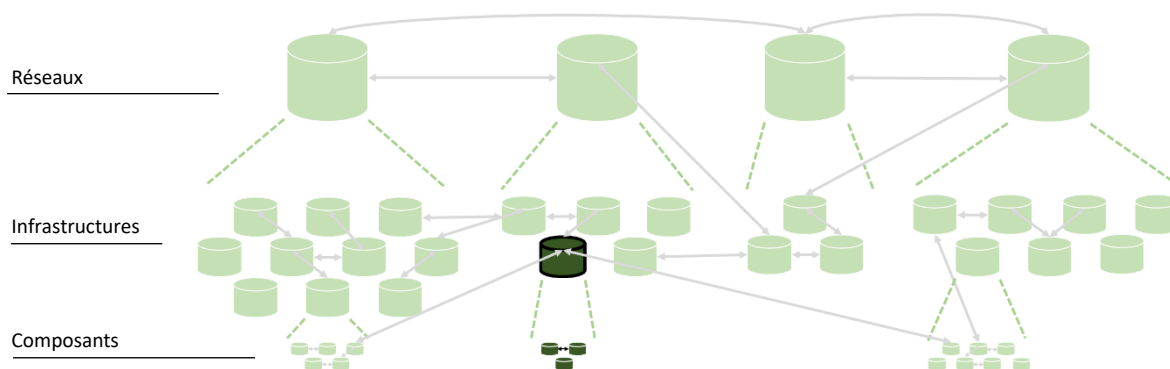


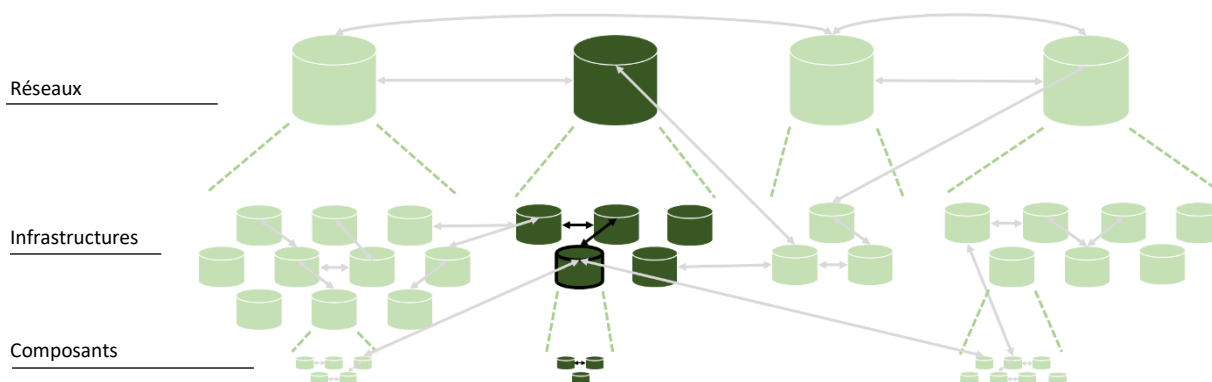
Figure 79 : Les différents niveaux de décomposition du système complexe composé des réseaux techniques urbains.

Cette observation amène la question du périmètre de l'analyse : la modélisation d'un composant ou d'une infrastructure peut se faire de façon isolée ou au contraire prendre en compte d'autres composants ou d'autres infrastructures dont le comportement peut avoir une influence sur celui de l'infrastructure centrale. Si l'on considère une infrastructure donnée, le choix des éléments à prendre en compte pour obtenir un modèle pertinent et conforme à la réalité de son comportement peut s'avérer ardu, pour conserver un équilibre entre faisabilité et performances. On illustre ce défi et la diversité des possibilités par les différents schémas de la Figure 80.

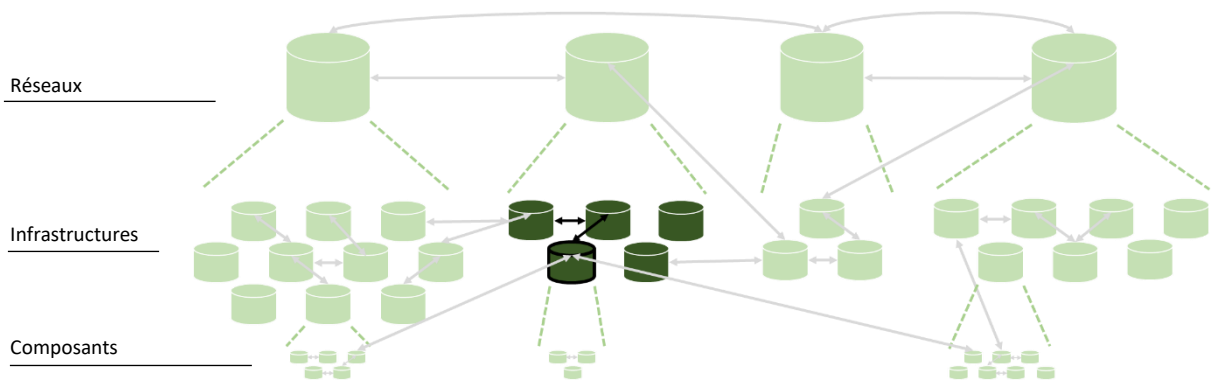
Il peut en effet être envisagé de ne considérer que l'infrastructure en question et ses composants, ou bien tous les systèmes correspondant au réseau dont il fait partie, ou encore de prendre en compte les systèmes entretenant un lien de dépendance (de premier ordre, de deuxième ordre...) avec l'infrastructure en question. Ce choix peut être influencé par différents aspects, notamment scientifiques et opérationnels comme nous le verrons plus loin.



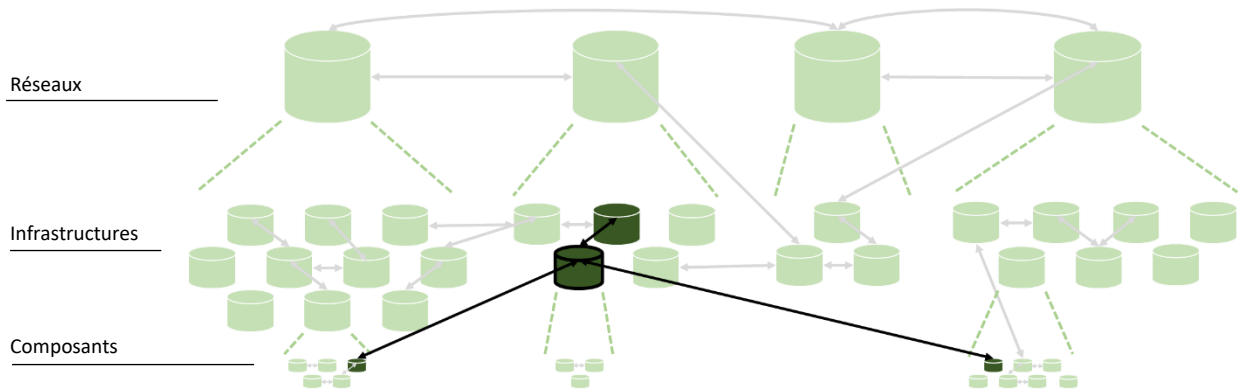
47.A. : Prise en compte de l'infrastructure et de ses composants. Exemple : modélisation d'une usine de traitement des eaux usées et de ses composants.



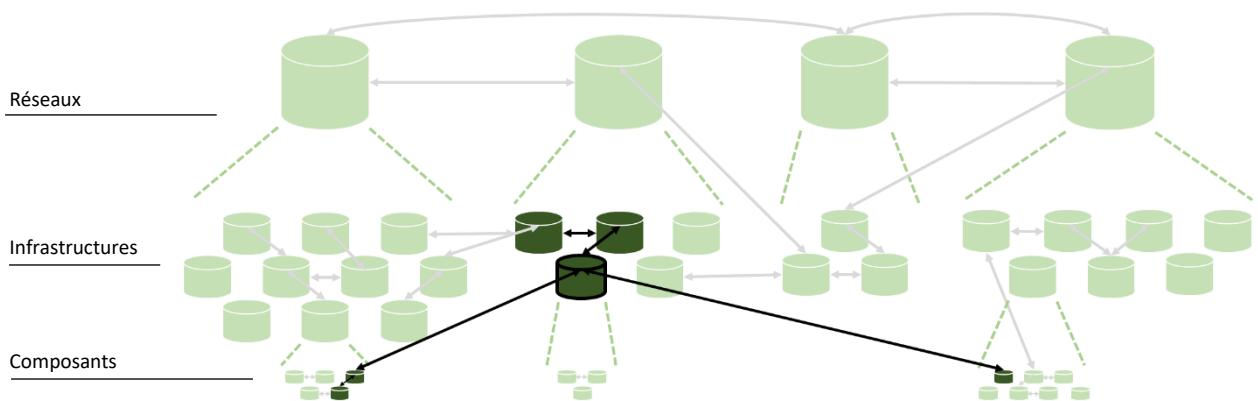
47.B. : Prise en compte d'un « silo », c'est-à-dire d'une infrastructure, de ses composants et des autres systèmes du réseau dont il fait partie. Exemple : modélisation du réseau d'assainissement, de ses infrastructures et des composants de celles-ci.



47.C. : Prise en compte des infrastructures du même niveau et du même réseau. Exemple : modélisation des infrastructures du réseau d'assainissement (usines de traitement, réseaux communaux, départementaux et régionaux de canalisations, exutoires...).

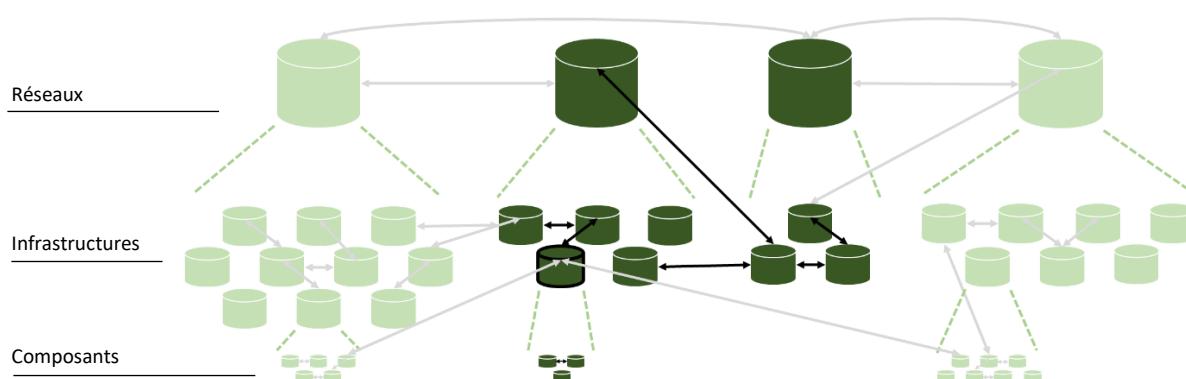


47.D. : Prise en compte des systèmes liés à l'infrastructure par une dépendance de premier ordre. Exemple : modélisation d'une usine de traitement des eaux usées et des infrastructures et composants dont elle est dépendante (notamment pour l'alimentation électrique).



47.E. : Prise en compte des systèmes liés à l'infrastructure par une dépendance de premier et deuxième ordre. Exemple : modélisation d'une usine de de traitement des eaux usées et des infrastructures et composants dont elle dépendante, ainsi que des infrastructures et composants dont ces derniers sont dépendants.





47.F. : Prise en compte de deux réseaux interdépendants, de leurs infrastructures et de leurs composants. Exemple : modélisation du réseau d'assainissement et de ses infrastructures et composants, ainsi que du réseau électrique (et de ses infrastructures) dont il est dépendant.

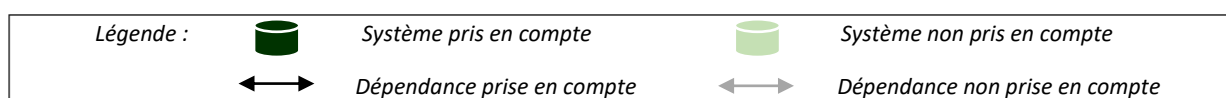


Figure 80 : Illustration de la diversité des périmètres d'analyse potentiels pour l'analyse et la modélisation d'un système.

Plusieurs niveaux d'analyse du fonctionnement des réseaux techniques urbains et des phénomènes de défaillances qui y surviennent ont été identifiés lors l'état de l'art. Ces niveaux d'analyse diffèrent à différents niveaux : la granularité des objets étudiés, les données nécessaires en entrée, et les résultats obtenus en sortie. Nous présentons dans la Figure 81 ces trois niveaux, qui représentent trois types d'analyse répandus mais non exhaustifs.

On associe généralement à l'analyse qualitative une assez faible granularité des objets étudiés, qui correspondent ici aux services urbains (par exemple l'assainissement, le chauffage urbain...) et aux enjeux majeurs (quartier d'affaires, port de marchandises...). Les données correspondant à ce niveau de détails sont souvent disponibles de façon libre et peuvent même être accessibles au grand public. Les résultats obtenus en sortie peuvent alors permettre notamment la construction de stratégies globales mais aussi l'identification de zones sensibles.

L'analyse semi-quantitative est quant à elle associée à une granularité intermédiaire, correspondant aux infrastructures composant les réseaux et les enjeux (par exemple les postes sources, les gares...). Cette échelle peut nécessiter des données libres mais aussi des données possédées par les opérateurs (position des infrastructures, liens fonctionnels exacts...) qui sont potentiellement confidentielles. Les résultats obtenus peuvent alors permettre notamment l'identification de points et nœuds critiques ainsi que l'identification de mesures et d'actions.

Finalement l'analyse quantitative est assimilée à une granularité correspondant aux composants des infrastructures (par exemple les postes de contrôle, les câbles, les portes étanches...). Cette échelle très fine nécessite des données quantitatives détaillées, détenues par les opérateurs ou calculées par des simulateurs sectoriels utilisés dans la gestion des différents réseaux. Les résultats obtenus peuvent alors permettre notamment la simulation de flux (de fluides, de personnes...) et surtout l'aide à la gestion de crise en temps réel.

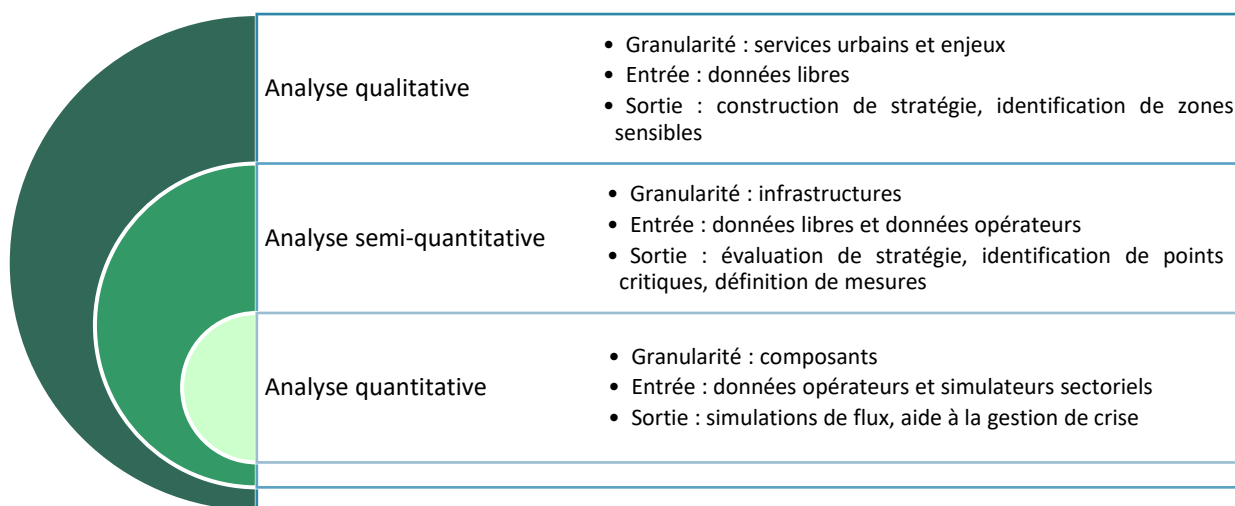


Figure 81 : Les différents niveaux d'analyse des (inter)dépendances et défaillances en cascade.

### 5.3.2. Le choix de l'échelle spatiale

L'échelle spatiale est un sujet primordial dans l'étude des interactions entre réseaux urbains, infrastructures, acteurs, territoires. Cela va en effet influencer sur de nombreux éléments : les objets et systèmes pouvant être pris en compte, les méthodes et outils potentiellement utilisables, les personnes devant être impliquées, le temps que le processus pourrait prendre, mais également les niveaux de granularité des données en entrée et en sortie envisageables. La relation entre les objectifs de modélisation, l'échelle spatiale et le type de données à traiter a notamment été étudiée par Grangeat (2017), comme illustré par la Figure 82.

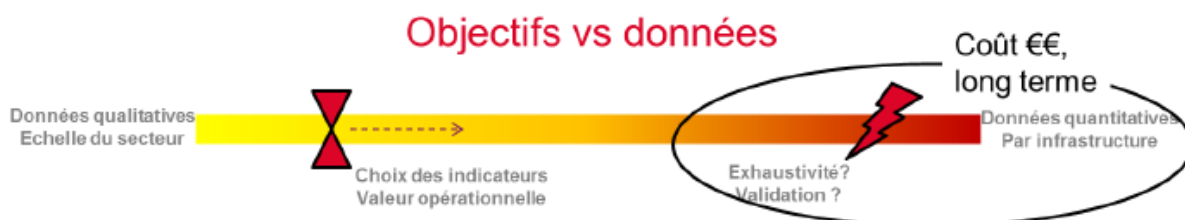


Figure 82 : Comparaison des objectifs et des données. Source : (Grangeat, 2017).

De façon générale, plus les données disponibles sont qualitatives, moins les résultats sont obtenus avec une granularité fine et plus il est faisable de considérer un périmètre étendu. Et plus les données disponibles seront quantitatives – au sens de la modélisation physique notamment - plus la granularité pourra s'approcher du composant d'une infrastructure et plus il sera difficile opérationnellement d'analyser un nombre important de réseaux sur une zone étendue. Cela a par ailleurs une forte influence sur des facteurs tels que les quantités de données nécessaires pour obtenir un résultat pertinent, mais aussi sur l'exhaustivité de ces données. De plus, les facteurs de coût, de délais, d'implication des acteurs entrent véritablement en jeu lorsqu'on se rapproche du côté droit de la Figure 82.

On réalise ici le lien étroit entre les questions de périmètre géographique de l'étude et de granularité de l'étude. Comme cela a été observé lors de l'état de l'art présenté au chapitre 4, il s'avère difficile de combiner à la fois échelle spatiale étendue géographiquement et granularité fine de l'étude. Une granularité fine signifie en effet plus de données détaillées à obtenir, plus d'acteurs à impliquer, plus de puissance de calcul, plus de temps pour récolter les données, pour les compiler et pour analyser les résultats...

Prenons l'exemple du réseau de distribution électrique au sein d'une agglomération donnée. Les systèmes généralement considérés comme pertinents pour une analyse au niveau de l'agglomération sont les infrastructures structurantes avec un rayonnement important, telles que les postes sources et les linéaires de réseau haute et moyenne tension. Si l'on diminue le périmètre du territoire d'étude, les systèmes considérés comme pertinents peuvent alors laisser la place à d'autres systèmes de granularité plus fine, au rayonnement plus réduit, tels que les postes de distribution et les linéaires de réseau basse tension. Cependant, les différents systèmes considérés demeurent reliés aux systèmes des autres niveaux de granularité et à ceux positionnés dans le périmètre plus large. Un modèle « idéal » est alors censé conserver la prise en compte de ces différents systèmes et de leurs relations. Cet « effet de zoom » est illustré par la Figure 83 à la page suivante, en prenant l'exemple d'un réseau théorique implanté sur le territoire français selon plusieurs niveaux de granularité, allant du niveau national au niveau local. L'apparition de nouveaux éléments lors du « zoom » est semblable à l'apparition d'éléments microscopiques sous l'objectif du microscope.

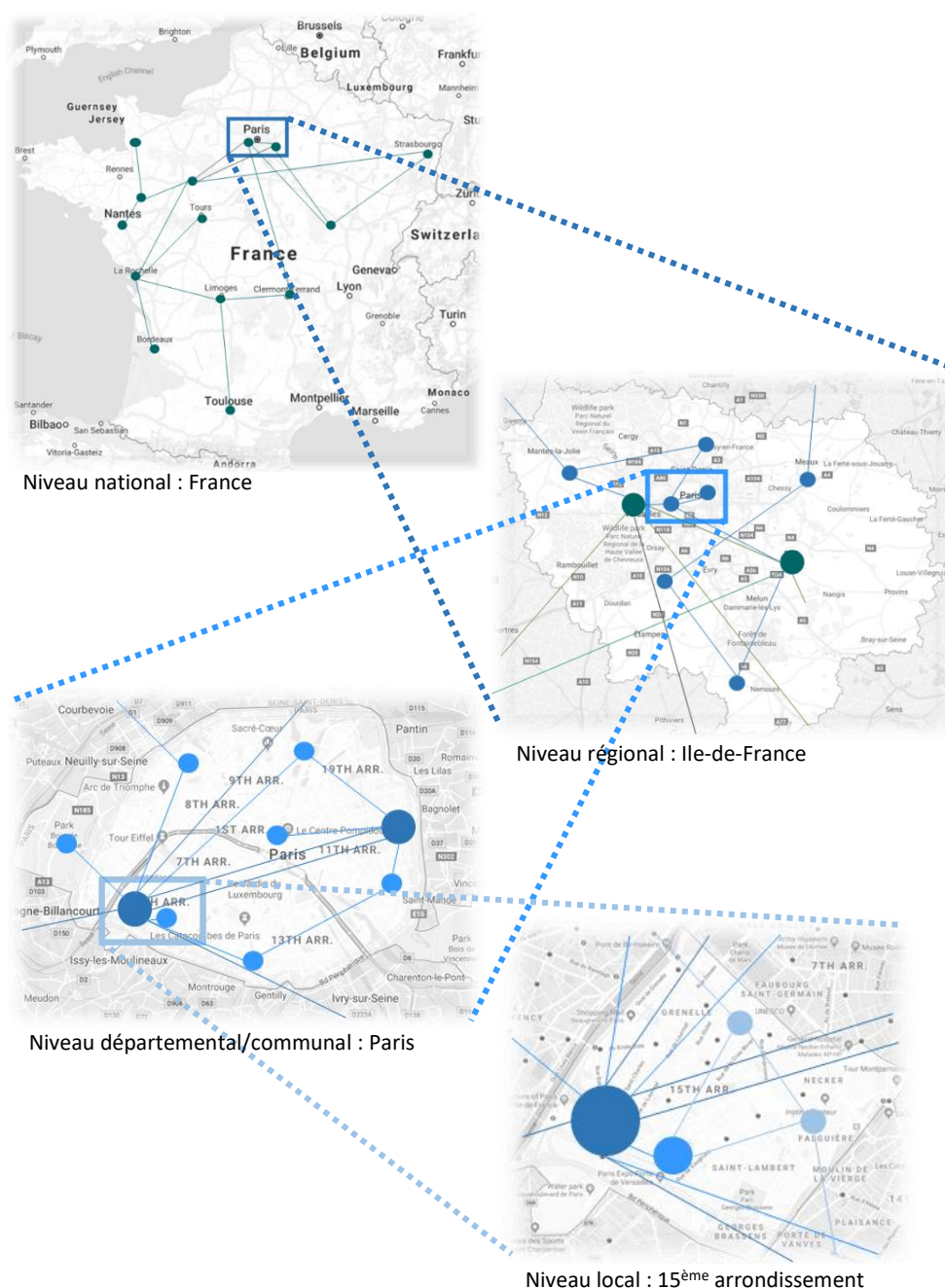


Figure 83 : Illustration de l' « effet de zoom » lorsqu'on limite la zone géographique prise en compte, en partant de l'échelle nationale pour arriver à l'échelle locale.

## 5.4. CONCLUSION

Ce chapitre s'intéresse à l'adaptation et la mise en œuvre opérationnelle d'une démarche d'analyse et de modélisation des (inter)dépendances et défaillances en cascade, et plus particulièrement aux enjeux et difficultés relatifs. Il permet de discuter de trois aspects identifiés comme primordiaux dans le cadre d'un processus de choix et de mise en œuvre.

Tout d'abord, l'importance de l'implication et de la participation des parties prenantes locales est soulevée et argumentée, ainsi que les difficultés et réticences associées. Les parties prenantes ne partagent en effet pas les mêmes objectifs et les mêmes obligations, ni les mêmes besoins et contraintes. La question des informations à renseigner pour implémenter les différentes démarches est ensuite discutée, en s'attardant sur les problématiques associées telles que leur nombre, leur diversité, leurs imperfections... mais aussi les moyens de les collecter. Finalement la question de la granularité de l'étude et du type de systèmes considérés est amenée. Elle permet notamment d'introduire la problématique de la sélection des éléments à considérer, selon –entre autres- leur granularité et l'échelle spatiale de la zone d'étude.

Les éléments présentés nous conduisent à considérer la mise en œuvre d'une démarche d'analyse et de modélisation des (inter)dépendances et défaillances en cascade comme un processus complexe, exigeant et long.

## CHAPITRE 6 : VERS UNE AIDE POUR LE CHOIX D'UNE DEMARCHE

Ce chapitre 6 a pour objectif de proposer des éléments pour soutenir le choix et la sélection d'une démarche d'analyse et de modélisation des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade.

Il propose tout d'abord d'exposer les limites de la modélisation des phénomènes étudiés, que ce soit les limites intrinsèques des modèles ou celles associées à la problématique, et démontre qu'une démarche « idéale », universelle, complète et opérationnelle semble aujourd'hui peu envisageable.

Le processus de construction et de mise en œuvre est ensuite décortiqué afin de recueillir les facteurs déterminant le choix d'une démarche. Ces facteurs peuvent alors permettre de déterminer la marche à suivre pour construire une approche adaptée à la fois aux objectifs poursuivis et au contexte opérationnel.

La question de l'adéquation d'une démarche à son contexte est finalement évoquée, en abordant les moyens à mettre en place pour assurer qu'une démarche soit adaptée à son contexte. Différents profils de démarches sont finalement proposés et caractérisés selon les objectifs définis et les paramètres contextuels, afin de faciliter le processus de choix et sélection.

### 6.1. L'ILLUSION D'UNE DEMARCHE « IDEALE »

Les recherches menées nous permettent d'avancer qu'en l'état actuel des recherches et des développements sur le sujet, mais aussi de la maturité de la plupart des parties prenantes opérationnelles, la mise en œuvre d'une démarche idéale, universelle et complète d'identification, d'analyse, de modélisation et de simulation des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade au sein de l'ensemble des réseaux techniques urbains n'est pas envisageable. Plusieurs constats nous amènent à cette conclusion. De nombreuses difficultés scientifiques, techniques et pratiques rendent laborieuse la construction et la mise en œuvre de modèles fidèles à la complexité et la dynamique de la réalité des réseaux techniques urbains (inter)dépendants.

#### 6.1.1. Les limites des modèles et des simulations

Un modèle est une structuration simplifiée de la réalité, qui présente des caractéristiques ou des relations supposées significatives bien qu'approximatives (Antoni et al., 2011). Il ne tient pas compte de toutes les variables, de toutes les observations empiriques et de toutes les mesures réelles prises. Un modèle permet alors de masquer certains détails pour se focaliser sur certains aspects de la réalité que l'on cherche à mieux comprendre ou prévoir. Pour notre champ de recherche, ces aspects sont évidemment les relations de dépendances au sein des réseaux techniques urbains, et les phénomènes de défaillances en cascade qui peuvent en résulter.

Un modèle éclaire ainsi une petite partie du monde « comme un projecteur éclaire une scène, plongeant automatiquement d'autres parties dans l'obscurité » (Bambrough, 1964). Et cette sélection implique que le modèle s'avère souvent éloigné de la réalité qu'il est censé représenter. Il peut se

révéler caricatural, mais peut également se révéler suffisamment simple pour être compris par ses manipulateurs, suffisamment représentatif pour qualifier correctement la réalité, et suffisamment complexe pour caractériser convenablement les systèmes modélisés (Antoni et al., 2011).

L'augmentation de la complexité du modèle et du nombre de paramètres et variables définis et pris en compte entraîne logiquement une amélioration des performances du modèle, c'est dire sa représentativité. Cependant, il est extrêmement difficile d'identifier les variables significatives dans le cas de systèmes complexes non linéaires tels que les réseaux techniques urbains. Et la multiplication de ces variables et paramètres entraîne également des exigences de calcul nouvelles.

Les réflexions menées jusqu'ici ne doivent pas occulter que la pertinence et l'utilité de ces modèles sont par ailleurs conditionnées aux connaissances disponibles à propos des systèmes étudiés et de leur comportement (Zio, 2018). Il convient ainsi d'accepter que certains éléments restent inconnus aujourd'hui. Quatre catégories d'événements et scénarios peuvent être alors définies dans le cadre d'analyses de risque (Zio, 2018) : ce qui était inconnu pour tous au moment de l'analyse, ce qui était inconnu pour les personnes menant l'analyse mais qui était connu par une tierce personne, ce dont on avait conscience de la possibilité d'occurrence bien que les connaissances disponibles ne fussaient pas, ce qui était connu et pour lequel les connaissances étaient disponibles.

L'utilisation des résultats de façon opérationnelle à la suite de l'implémentation est également à considérer avec attention. Les résultats vont potentiellement déterminer des travaux structurels, des réorganisations au sein d'un service technique, la définition de politiques particulières, des arbitrages entre différentes solutions techniques... Des résultats imprécis, non fidèles à la réalité, obtenus avec des modèles non validés auraient alors des conséquences néfastes non négligeables. C'est donc ici qu'interviennent les processus de vérification et validation des modèles développés, bien que le risque soit toujours présent.

Les constats présentés ci-dessus sont autant de limites à la construction et la mise en œuvre de modèles fidèles à la réalité, et à la complexité de celle-ci. Le comportement de ces systèmes rend alors discutable l'adéquation des méthodes classiques utilisées. Il semble que le développement d'une solution unique et universelle pour l'analyse et la modélisation des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade soit difficilement atteignable aujourd'hui.

Il convient alors de construire des démarches dédiées et adaptées à un contexte particulier, en accord avec les pratiques locales, soutenues par les acteurs et décideurs, mais aussi composites et flexibles comme nous le verrons par la suite. Cette vision ne semble cependant pas répandue aujourd'hui, et il apparaît que les personnes et institutions en charge du développement de ces démarches préfèrent appliquer leur propre démarche et leurs méthodes de modélisation de prédilection plutôt que de partir du contexte.

### 6.1.2. Une problématique complexe et en constante évolution

L'identification, l'analyse, la modélisation et la simulation des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade est une problématique extrêmement complexe, de par la complexité de toutes ses composantes : les réseaux techniques, les phénomènes d'(inter)dépendances, les défaillances en cascade, la modélisation de phénomènes complexes... Aujourd'hui, de nombreux modèles et méthodes permettent de représenter et prévoir le comportement d'un type d'infrastructure ou d'un système donné.

Mais, comme cela a été soulevé précédemment, la modélisation des liens entre plusieurs infrastructures de plusieurs réseaux pose toujours problème. La forte complexité de la problématique et des cinétiques divergentes entre les parties prenantes peuvent entraîner une déconnexion et un décalage entre des démarches développées dans un contexte de recherche scientifique et académique et la réalité opérationnelle qu'elles souhaitent représenter. On assiste alors à la multiplication d'outils compliqués construits de façon indépendante, et parfois en l'absence de partenaires opérationnels. Ces outils finissent par rejoindre le « cimetière à outils », faute d'avoir pu être implémentés, renseignés, améliorés et discutés avec les parties prenantes opérationnels et les utilisateurs finaux.

Un réseau solide d'acteurs, l'accès à des données réelles, la puissance de traitement disponible, l'assistance aux décideurs, la disponibilité des ressources et des délais longs ont une incidence importante sur le succès d'une démarche. Ces limites opérationnelles sont centrales et indissociables des aspects scientifiques et théoriques, et seront détaillées par la suite. Par exemple, l'accès à des données réelles est un problème majeur et est essentiel à la mise en œuvre réussie de différentes méthodologies.

Il semble que les méthodes les plus empiriques soient aujourd'hui les plus utilisées de manière opérationnelle pour le moment. Comme décrit par Setola & Theocharidou (2017), un modèle plus détaillé ne signifie pas nécessairement un modèle plus précis, en particulier parce qu'il nécessite alors souvent de nombreuses hypothèses, pouvant avoir des effets importants sur les résultats. Les recherches empiriques du chapitre 3 soulignent d'ailleurs que ces phénomènes se limitent souvent à des défaillances en cascade de premier et de second ordre et surviennent majoritairement au sein de quelques secteurs urbains. Cette observation pourrait alors remettre en cause l'intérêt de développer des démarches puissantes, détaillées, techniques, coûteuses, longues, et prenant en compte tous les secteurs d'ordre supérieur.

Néanmoins, ces observations sur les ordres limités de défaillances en cascade sont valables pour des défaillances en cascade entre différents réseaux urbains. Elles sont en effet plus nombreuses et plus fréquentes au sein d'un même réseau, et les gestionnaires les considèrent parfois comme faisant partie de leur quotidien. De même, des défaillances en cascade plus complexes et d'ordre plus élevé peuvent survenir lors d'événements majeurs, où de multiples aléas affectent de manière séquentielle ou concomitante de nombreux réseaux et infrastructures (inter)dépendants sur une très vaste zone.

Il apparaît finalement plus pertinent de répondre à une commande spécifique et réaliste plutôt que de chercher à développer un outil trop complexe, qui nécessiterait la définition de nombreuses hypothèses et le renseignement de très nombreuses données incertaines, et qui potentiellement ne conviendrait pas aux parties prenantes et utilisateurs pris individuellement. Une étude amont du contexte, des attentes des parties prenantes, des ressources disponibles est alors nécessaire pour la définition des besoins et des contraintes, comme discuté dans la suite du chapitre.

L'équilibre précaire entre les bénéfices potentiels et les difficultés auxquelles il faut faire face lors des recherches et des expérimentations concernant les phénomènes de défaillances en cascade est représenté par la Figure 84.

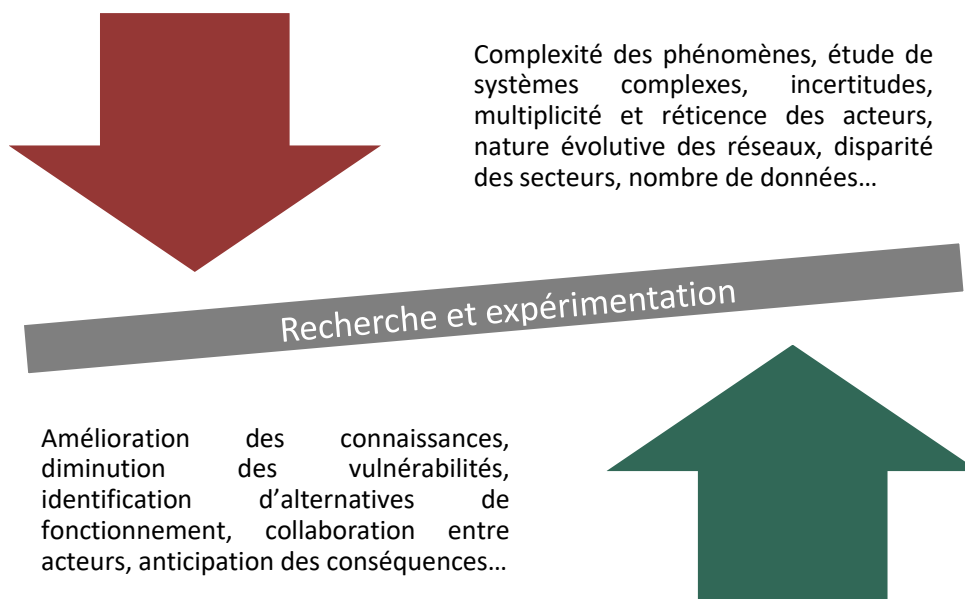


Figure 84 : Un équilibre fragile entre les bénéfices attendus et les difficultés.

La cinétique de cette problématique est par ailleurs relativement rapide, particulièrement en regard du temps que la mise en œuvre d'une démarche ciblée nécessite. Du côté des objets d'étude, les évolutions concernant les phénomènes, leur contexte et leurs enjeux sont en effet fréquentes. Le cadre législatif et réglementaire est potentiellement amené à évoluer, ainsi que le cadre politique qui s'intéresse de plus en plus à cette question. Les parties prenantes peuvent transformer leurs pratiques et les dynamiques en place au gré des changements de direction, des turnovers et des évolutions structurelles. Les données disponibles peuvent finalement évoluer assez rapidement, en fonction notamment des technologies mises en place et des politiques de partage.

La configuration et l'organisation des réseaux techniques, et le fonctionnement de leurs infrastructures, peuvent également être amenés à évoluer rapidement, au gré des travaux, investissements, réorganisations prévus ou inopinés. Du côté des méthodes et outils, on assiste parallèlement à un certain foisonnement des recherches et des initiatives ces dernières années, ce qui résulte en la multiplication des possibilités de modélisation et en des évolutions continues.

## 6.2. LES FACTEURS INFLUANT LE CHOIX D'UNE DEMARCHE

Les travaux effectués dans le cadre de l'état de l'art des démarches à travers le monde mais aussi des projets de recherche cherchant à développer des outils opérationnels pour l'analyse et la modélisation des (inter)dépendances et défaillances en cascade ont permis d'identifier les éléments qui caractérisent un tel processus.

### 6.2.1. La caractérisation du processus

Le processus d'analyse et de modélisation des (inter)dépendances et défaillances en cascade est complexe – et cyclique- et peut être caractérisé et influencé par de nombreux éléments, qui sont représentés schématiquement par la Figure 85 et listés ci-dessous :



- Le contexte : Que ce soit dans ses dimensions technique, territoriale ou organisationnelle, le contexte de l'analyse est déterminant car il conduit à des choix stratégiques.
  - Technique : Le contexte technique comprend notamment les réseaux techniques et infrastructures à étudier, les outils et méthodes déjà en place pour leur gestion.
  - Territorial : Le contexte territorial inclut notamment les spécificités morphologiques, l'échelle du territoire, les aléas auquel il est exposé, les enjeux qui le composent et les réglementations qui s'y appliquent.
  - Organisationnel : Le contexte organisationnel englobe les parties prenantes, les échanges et actions en place, et les besoins opérationnels.
  
- Les ressources disponibles : Les ressources et moyens disponibles vont déterminer la faisabilité opérationnelle des démarches envisagées.
  - Informations : Les différents moyens de collecte d'informations englobent les études bibliographiques, les enquêtes et les questionnaires, les ateliers et les retours d'expérience.
  - Outils : Les outils disponibles et envisageables comprennent les différentes méthodes et démarches identifiées (tels que des simulateurs sectoriels ou les simulateurs multi-agents par exemple).
  - Echanges entre parties prenantes : Des échanges entre les parties prenantes seront nécessaires à la mise en œuvre d'une démarche collective, et peuvent prendre la forme par exemple de réunions et ateliers collaboratifs, d'exercices ou de relations plus poussées.
  - Ressources humaines et budgétaires : Les moyens humains et budgétaires (personnel dédié, porteur de l'initiative, moyens financiers ou logistiques...) peuvent être déterminants pour la faisabilité opérationnelle de la démarche.
  
- Les choix de modélisation : Des choix concernant la modélisation recherchée vont être réalisés et vont influencer les résultats obtenus et leur portée.
  - Objectifs : Des objectifs précis, décidés par les porteurs et parties prenantes, auront des implications en termes de modélisation.
  - Echelle et granularité : L'échelle de la zone étudiée et la granularité des objets modélisées auront également des implications en termes de possibilités de modélisation.
  - Evolution temporelle : La prise en compte du temps comme variable continue, comme variable discrète, ou la non prise en compte du temps vont influencer la modélisation.
  - Dépendances et défaillances en cascade : Les (inter)dépendances et les défaillances en cascade sont les phénomènes au cœur de la modélisation. Les défaillances en aggravation peuvent également y figurer.
  
- Les résultats attendus : Les résultats des analyses et modélisations obtenus peuvent être de différentes natures.
  - Analyse qualitative : Une analyse de type qualitative peut permettre par exemple un diagnostic statique, une cartographie des services et de leurs relations, l'identification de zones sensibles ou de zones d'appui...
  - Analyse semi-quantitative : Une analyse de type semi-quantitative peut permettre notamment une modélisation fonctionnelle de zones sensibles ou de zones d'appui, l'identification d'infrastructures essentielles, la modélisation de défaillances en cascade de premier ordre...

- Analyse quantitative : Une analyse quantitative peut résulter par exemple en une visualisation spatiale et temporelle de scénarios techniques de défaillances en cascade, de deuxième ou troisième ordre notamment.
- Analyse complète : Une analyse dite complète, encore utopique aujourd'hui, pourrait idéalement permettre une visualisation en temps réel des défaillances en cascade et en aggravation, et pourrait être connectée à un système d'alerte et être intégrée à la gestion de la continuité d'activité.
- Visualisation : La visualisation des résultats peut se faire sous forme cartographique, sous forme de courbes ou de graphes, sous forme de simulations physiques...

Grâce à la caractérisation du processus présentée ci-dessus et à l'analyse de différentes mises en oeuvre des démarches étudiées dans le cadre de l'état de l'art et dans le cadre des projets de recherche auxquels nous avons participé, nous proposons ici d'identifier différents déterminants à considérer lors du choix et du développement d'une démarche pertinente pour un contexte donné.

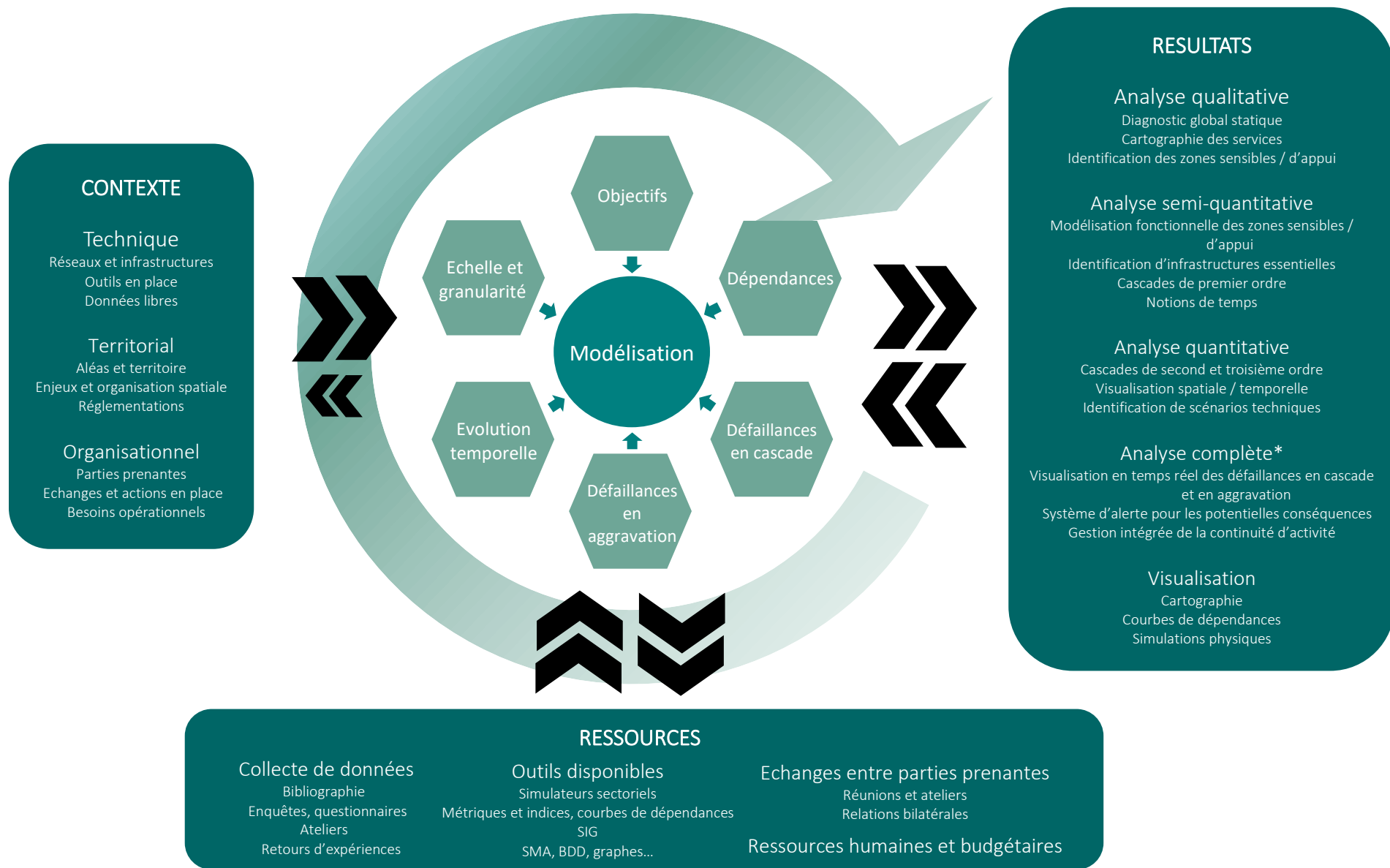


Figure 85 : Caractérisation du processus d'analyse et de modélisation des phénomènes d'(inter)dépendances et défaillances en cascade au sein des réseaux techniques urbains.

## 6.2.2. Identification de déterminants « théoriques » à considérer pour le choix et le développement d'une démarche adéquate

Nous avons cherché à identifier les différents facteurs pertinents dans le cadre de l'identification des démarches appropriées à un contexte précis, c'est-à-dire en considérant les différents éléments que sont le territoire, les parties prenantes, les systèmes techniques mais aussi les objectifs etc. Nous identifions tout d'abord différents critères dits « théoriques », qui sont détaillés ci-dessous.

Ces facteurs relèvent donc d'une analyse plutôt théorique de la problématique des (inter)dépendances et des défaillances en cascade au sein des réseaux techniques urbains. Ils considèrent de façon objective et rationnelle la situation et les possibilités offertes par celle-ci, sans tenir compte des questions de jeux d'acteurs ou de ressources disponibles et autres. De façon grossière, ces critères tentent de répondre à la question : « Quelle démarche pourrait répondre au mieux aux objectifs définis par les décideurs dans la zone d'étude définie ? ». Des facteurs considérant les contraintes opérationnelles seront ensuite identifiés, afin de permettre une vision plus complète de la situation.

### 6.2.2.1. Les objectifs « théoriques » poursuivis par les décideurs et l'utilisation souhaitée des résultats

Les décideurs, selon leur profil et leur mission, désignent ceux qui procéderont au choix effectif d'une démarche à mettre en œuvre à la fin d'un processus de recherche et de comparaison (exemples : chercheurs académiques, experts, le service de gestion des risques, etc.). Ceux-ci peuvent avoir des objectifs divers au sein du champ de l'étude des défaillances en cascade. Ces objectifs peuvent notamment correspondre aux différentes étapes identifiées auparavant, à savoir l'identification des (inter)dépendances, leur formalisation, la modélisation des relations d'(inter)dépendances et des défaillances en cascade induites, la simulation de scénarios de défaillances, et enfin l'aide à la décision. Bien que la réalisation de ces étapes soient dépendantes d'autres facteurs tels que la disponibilité des données ou des ressources nécessaires, une impulsion réfléchie des décideurs est indispensable pour initier une démarche réussie.

L'objectif recherché peut être par exemple la construction d'un diagnostic global et fonctionnel du système urbain, et des réseaux techniques qui le composent. Ou bien une étude détaillée et plus confidentielle reposant sur le fonctionnement physique de quelques réseaux donnés dans un périmètre particulièrement vulnérable, afin de déterminer une priorisation de solutions palliatives pressenties. Il est aisé de réaliser que les possibilités sont très nombreuses, et que les objectifs poursuivis sont le premier facteur impactant la construction d'une telle démarche. Les objectifs poursuivis peuvent par exemple entraîner une sélection des aléas pris en compte ou des systèmes à modéliser. Les stratégies de sélection des systèmes seront présentées à la fin du chapitre.

Par ailleurs, la façon dont seraient utilisés les résultats obtenus est une question primordiale lors du processus de sélection et de construction d'une démarche, que ce soit l'utilisation par les décideurs ou l'utilisation par les parties prenantes. En effet, les résultats obtenus peuvent être employés de différentes manières, comme identifié dans le chapitre 4. Par exemple, si les résultats doivent permettre d'identifier des liens de dépendances jusque-là inconnus entre certaines infrastructures, la granularité et le niveau de détails en sortie devront être suffisants pour obtenir des informations au niveau de l'infrastructure. Si les résultats doivent permettre l'arbitrage entre plusieurs solutions palliatives, les données en sortie devront permettre la réalisation d'un ratio coûts/bénéfices ou d'un équivalent. D'un autre côté, si les résultats sont censés être assimilés et manipulés par des personnes non spécialistes du sujet, il sera nécessaire que ceux-ci soient dans un format accessible à tous.

La nature, le format, le niveau de granularité et de détail des résultats obtenus, dictés en partie par leur utilisation future, vont alors potentiellement déterminer différentes caractéristiques de la démarche à implémenter.

#### 6.2.2.2. L'échelle de la zone d'étude

Un des facteurs pouvant également influencer de façon non-négligeable le choix ou le développement d'une démarche pour l'analyse des (inter)dépendances et des défaillances en cascade est l'échelle de la zone d'étude choisie, c'est-à-dire le périmètre géographique. En effet, une zone correspondant à un pâté de maison ou une zone correspondant à une agglomération entière n'auront pas les mêmes caractéristiques et nécessiteront des approches assez différentes. La question de la complexité et de la granularité de l'étude peut également entrer ici en jeu.

#### 6.2.2.3. Les réseaux urbains implantés sur la zone d'étude et leurs caractéristiques

La caractérisation des réseaux implantés sur la zone d'étude est une étape essentielle du processus de choix d'une méthode car leur nombre et leur nature peuvent influencer sur la faisabilité des méthodes d'étude des défaillances en cascade. Il semble censé qu'une démarche centrée sur deux réseaux d'un quartier périphérique diffère d'une démarche centrée sur l'ensemble des réseaux techniques d'un centre-ville.

Les modes de gestion et d'organisation des réseaux techniques urbains étudiés ont également leur importance. En effet, il est aujourd'hui assez répandu qu'un même réseau soit géré par plusieurs acteurs à la fois et cela peut influencer certains choix. On pense notamment aux télécommunications, où certains opérateurs utilisent le réseau physique d'infrastructures d'autres opérateurs, ou à la distribution d'électricité, où les différentes étapes de production, transport et distribution sont gérées par des acteurs différents. La gestion télécommandée des infrastructures a également une incidence sur les démarches potentiellement applicables.

De plus, l'utilisation préalable d'outils métiers spécifiques ou non par les gestionnaires de réseaux peut avoir un poids certain dans la sélection d'une approche plutôt qu'une autre, notamment dans le cas du choix d'une approche fédératrice. En effet, l'implémentation préalable de simulateurs peut être une condition nécessaire au préalable pour sa mise en œuvre.

### 6.2.3. Identification de déterminants « contextuels » pour le développement ou le choix d'une démarche adéquate

L'analyse poussée des démarches d'identification, de modélisation et de simulation des (inter)dépendances et des défaillances en cascade nous a amenés à considérer l'importance de l'étude du contexte dans le processus de développement ou du choix d'une démarche plutôt que d'une autre. Une telle initiative – qui sera basée sur des données de terrain et des interactions entre acteurs locaux, ainsi que sur des principes de fonctionnement techniques précis- ne peut être élaborée en ne prenant en compte que des facteurs scientifiques détachés du contexte opérationnel.

Il ressort par ailleurs que les méthodes existantes aujourd'hui ont été pour la plupart élaborées dans un contexte précis, que ce soit en termes d'aléas potentiels, en termes d'organisation et de gouvernance mais aussi – et surtout - de savoirs et de volonté des acteurs. Ce type de processus ne peut en effet être réussi sans une collaboration très étroite avec les acteurs locaux, qui en seront les utilisateurs mais aussi les sources d'informations principales voire ceux qui les mettront en œuvre. Il

apparaît que la construction d'un réseau d'acteurs solide, l'accès aux données réelles, la puissance de calcul disponible, le soutien des décideurs, la disponibilité de moyens et de délais importants conditionnent très fortement le succès d'une initiative. L'analyse des cas d'étude à travers le monde nous a ainsi permis d'identifier divers facteurs plus opérationnels influençant le choix d'une méthode selon les contextes de mise en oeuvre, qui se sont révélés très divers :

#### 6.2.3.1. Les objectifs « annexes » poursuivis par les décideurs

Les objectifs politiques, économiques et techniques poursuivis par les décideurs peuvent être très divers selon les contextes. Ceux-ci peuvent influencer le choix d'une approche plutôt qu'une autre, même s'ils ne sont parfois pas clairement exprimés.

Les décideurs peuvent ainsi viser une démarche très collaborative et ouverte, en accordant plus d'importance - dans un premier temps du moins - à la mise en place d'une dynamique d'échange et de rapprochement entre les parties prenantes qu'aux résultats opérationnels obtenus. Des approches purement économiques de réduction des dommages par exemple peuvent également être envisagées.

#### 6.2.3.2. La motivation et l'implication des parties prenantes

La volonté et la motivation des décideurs et des autres parties prenantes, mais aussi leur capacité à prendre en main la démarche et à se l'approprier sont primordiales. Un degré de motivation et de volonté élevé est un élément fondamental pour mettre en oeuvre un processus de sélection, de développement et de mise en oeuvre d'une démarche d'une telle ampleur. L'appropriation par les parties prenantes dépend notamment du caractère intelligible de la démarche et de ses tenants et aboutissants. Ceci est un aspect central lorsque la collaboration se fait avec des acteurs sollicités de toute part, aux responsabilités nombreuses, et non spécialistes de ces questions. Les parties prenantes désignent d'ailleurs ici les décideurs mais aussi les experts sur le terrain, les chercheurs associés, les gestionnaires de réseaux, les services techniques...

Le niveau d'implication potentiel des gestionnaires de réseaux et d'infrastructures est déterminant, car ils sont les principaux fournisseurs de données et d'expertise. Différents paramètres de la démarche retenue seront conditionnés par leur niveau de participation, qui peut par exemple dépendre de contraintes juridiques, d'intérêts économiques...

#### 6.2.3.3. Le niveau de connaissances mobilisables et les données disponibles

Le choix de la démarche à implémenter va être influencé par la quantité et la qualité des connaissances mobilisables par les personnes devant réaliser ce choix. Il faut donc que celles-ci puissent avoir accès à des connaissances précises, objectives et complètes – notamment concernant les démarches existantes - pour pouvoir faire un choix éclairé.

Un autre paramètre majeur dans le choix d'une méthode est bien entendu le niveau et la quantité des données techniques et fonctionnelles disponibles, car elles sont nécessaires pour pouvoir renseigner le futur modèle. Il est apparu que l'accès à des données réelles et fiables est un défi majeur, et une des conditions centrales au succès de la mise en place des différentes démarches.

En effet, on assiste à de nombreuses difficultés relatives au recueil de données réelles précises, détaillées, fiables et correspondant au bon format. Cela entraîne d'ailleurs différentes limitations pour l'implémentation des approches mathématisées et très quantitatives, qui nécessitent des données précises, confidentielles, nombreuses, provenant d'acteurs divers, et surtout évoluant rapidement.

#### 6.2.3.4. Les ressources disponibles

La question des ressources humaines et budgétaires disponibles pour la mise en place de la méthode est également essentielle. Certaines démarches peuvent par exemple nécessiter l'emploi à temps plein de plusieurs ingénieurs ou informaticiens, l'achat ou la location d'une licence de logiciels, l'achat de capteurs ou de matériel informatique, la rémunération de consultants ou d'experts... Le temps qui pourra être consacré à la mise en œuvre de la méthode est également un élément dont il faut tenir compte. En effet, la démarche ne sera pas la même selon que l'on dispose de quelques mois ou de plusieurs années pour mettre en place la méthode retenue.

On remarque que la motivation des parties prenantes et les ressources disponibles sont très liées, et qu'une forte volonté politique est susceptible de les réunir, ainsi que les connaissances mobilisables.

### 6.3. GARANTIR L'ADEQUATION D'UNE DEMARCHE A SON CONTEXTE

Diverses limitations et défis relatifs à la construction et la mise en œuvre de modèles portant sur les phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade au sein des réseaux techniques et fidèles à une réalité complexe ont été soulevés. Il apparaît qu'une solution unique, universelle, multi-scalaire, multi-granulaire et quantitative pour l'analyse et la modélisation de ces phénomènes n'est aujourd'hui pas envisageable. Les résultats obtenus ainsi après un long temps de construction et de mise en œuvre ont par ailleurs des chances d'être déjà obsolètes au moment de leur finalisation.

Des approches aux objectifs plus restreints, dédiées et adaptées au contexte de mise en œuvre, en accord avec les pratiques locales, soutenues par les parties prenantes, mais également composites et flexibles pourraient être plus adaptées à relever les défis associés à la problématique. Un cadre semble nécessaire pour distinguer les démarches éventuelles et permettre leur intégration et articulation selon le contexte et les objectifs poursuivis.

Une spécification des trois types d'approches identifiés dans le chapitre 4 par le biais des facteurs identifiés ci-dessus est présentée. Le processus de définition d'une démarche adaptée à un contexte donné est ensuite discuté. Plusieurs profils-types de démarche sont ensuite définis et décrits.

#### 6.3.1. Déterminer les contours d'une démarche dans un contexte donné

Le succès d'une démarche d'analyse et de modélisation des défaillances en cascade au sein des réseaux techniques urbains est conditionné à de nombreux aspects. La démarche doit être capable de répondre aux besoins des parties prenantes et ce malgré leurs contraintes, d'utiliser une grande variété de données (qui peuvent être incertaines), de s'adapter à des résolutions spatio-temporelles et des granularités variables, de tirer parti des connaissances et outils locaux. La question des résolutions spatio-temporelles et des granularités variables est centrale car les parties prenantes n'utilisent pas les mêmes référentiels, langages, formats, et niveaux d'analyse.

Il semble donc nécessaire de mettre en place des démarches multi-granulaires, multi-scalaires et flexibles, selon les objectifs poursuivis par les porteurs de celles-ci. Une démarche d'étude et de modélisation des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade doit être construite et développée dans le but de répondre à ces objectifs, et non dans le but de modéliser le maximum de

systemes et de phenomenes possibles. Il apparait egalement que ces demarches doivent etre pensees dans leurs contextes de mise en oeuvre, et adaptees aux caracteristiques de ceux-ci.

En tant qu'entites portant des interets economiques, politiques, strategiques differents divers et varies, les acteurs locaux ont des visions disparates voire contradictoires. Il est donc indispensable, afin de collecter de facon organisee et pertinente leur vision, d'etablir un processus robuste de recueil des besoins, limitations, contraintes et volontes des acteurs impliquees dans le processus final d'elaboration et d'utilisation de la methode. Nous proposons dans le Tableau 30 une liste de sujets a aborder afin de recolter les informations utiles et pertinentes aupres des differentes parties prenantes d'un contexte donne, qui decoule des facteurs proposes precedemment.

Tableau 30 : Grille d'analyse du contexte aupres des parties prenantes.

| SUJETS A ABORDER  | TYPE              |
|---|-------------------|
| Objectifs theoriques des decideurs, selon leur nature                               | Besoin            |
| Utilisation et niveau de details desire des resultats                               | Besoin            |
| Zone d'etude selectionnee   | Besoin            |
| Reseaux urbains implantes et outils metiers utilises                                | Contrainte        |
| Objectifs politiques, economiques et techniques des decideurs                       | Besoin            |
| Volonte et la motivation des decideurs  | Besoin-Contrainte |
| Niveau de connaissance mobilisable par les decideurs                                | Contrainte        |
| Niveau de details et quantite des donnees disponibles                               | Contrainte        |
| Niveau d'implication potentiel des gestionnaires                                    | Contrainte        |
| Ressources humaines et budgetaires disponibles pour la mise en place de la demarche | Contrainte        |

Un travail de collaboration doit donc etre instaure, ainsi que des allers-retours entre les differentes parties prenantes. Un processus se rapprochant d'une co-creation, avec les difficultes operationnelles associees, semble donc approprie. Cette collaboration doit notamment permettre de :

- Definir des objectifs coherents et acceptes par les parties prenantes
- Installer un cadre de travail commun et des definitions partagees
- Tirer parti des expertises et connaissances existantes
- Definir une demarche adaptee au contexte et aux parties prenantes
- Declencher une emulation collective



- Tirer parti des initiatives et outils déjà en place
- Consolider l'implication des parties prenantes
- Sélectionner les éléments à considérer (systèmes, aléas, zone...)

Face à la diversité, la complexité et le nombre de systèmes à considérer pour les réseaux techniques urbains, il est possible de réduire le champ de l'étude et de ne sélectionner que certains systèmes. Cette possibilité a notamment été introduite lors de la discussion concernant les visions analytique et systémique. Il est important de souligner à nouveau les limites de cette sélection, qui peut être basée sur des critères de pertinence, d'appartenance à un système de système, de criticité, de localisation, de rayon d'action... En effet, un élément qui semble secondaire avant l'analyse détaillée des liens existants entre les composants peut être à l'origine d'une importante dépendance cachée, masquée par un composant majeur par exemple. Une étude préliminaire plus analytique pour la décomposition et l'étude physique des composants d'un système complexe est parfois nécessaire, avant de ne retenir que les éléments importants en termes de défaillances en cascade.

Les éléments sélectionnés peuvent ainsi correspondre aux systèmes constituant un ou des services considérés comme essentiels en amont, aux systèmes situés dans une zone considérée comme sensible, ou encore aux infrastructures considérées comme critiques (de par les dépendances entrantes et sortantes et / ou de par leur rayon d'action par exemple). Ces principes sont illustrés dans la Figure 86.

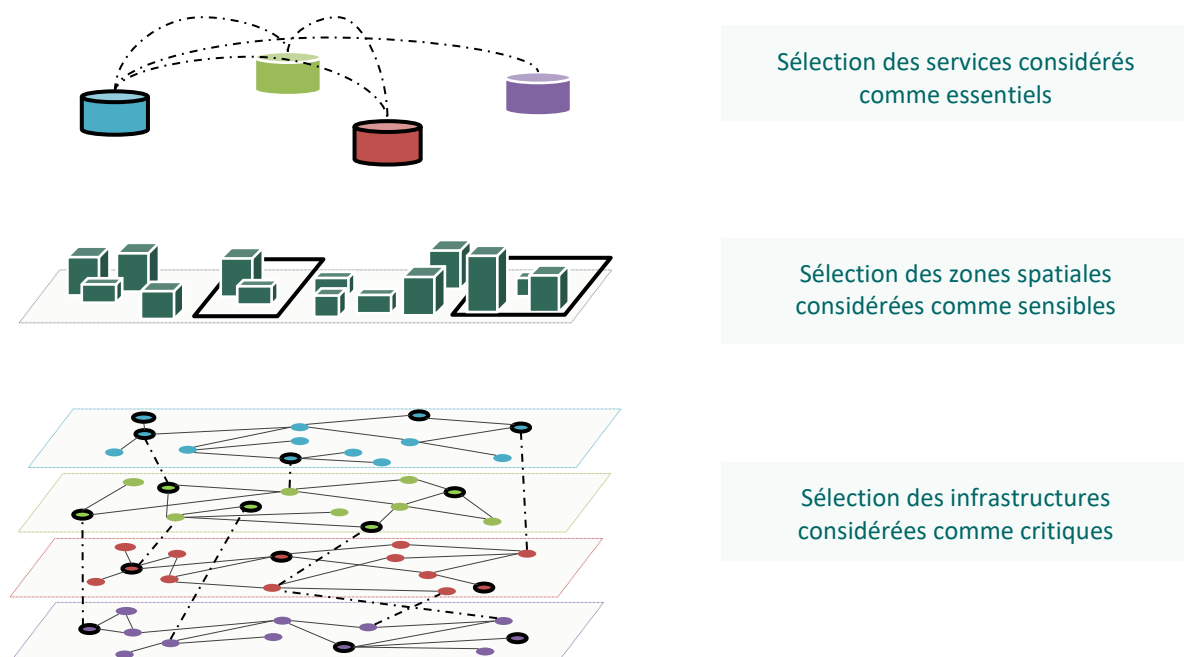


Figure 86 : Stratégies de sélection des systèmes à modéliser.

On peut par exemple choisir de n'étudier que la distribution d'électricité et les télécommunications de par les nombreuses dépendances sortantes de ces deux réseaux. Ou se concentrer sur un quartier d'affaires ou un quartier contenant des captages d'eau potable comme le projet RESCCUE l'a fait à Lisbonne (Barreiro et al., 2017), voire sur certaines infrastructures particulières situées en zone inondable par exemple.

La sélection des éléments à considérer peut alors se faire par la diminution du périmètre géographique ou par la diminution du type et du nombre d'objets étudiés, comme illustré par la Figure 87.

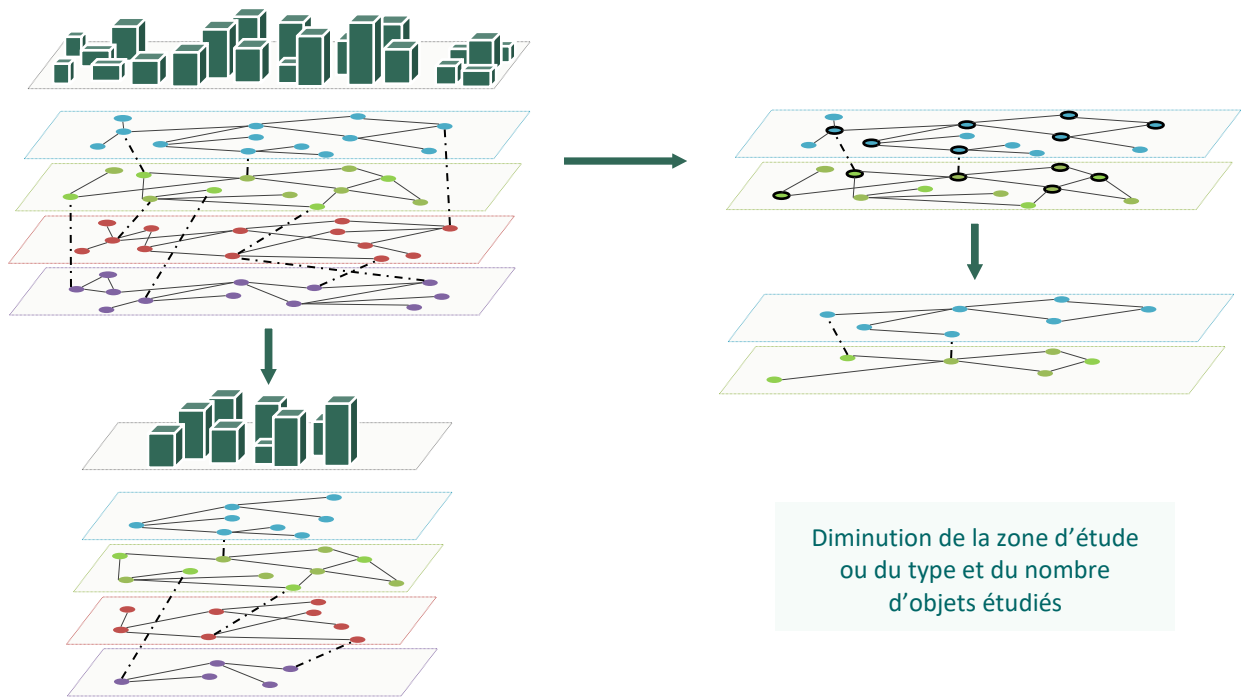


Figure 87 : Diminution du périmètre géographique ou du type et du nombre de systèmes à modéliser.

La portée de l'analyse peut alors prendre différentes formes, selon les choix qui seront faits. Ces choix concernent notamment le périmètre de la zone d'étude, le type de systèmes considérés ou la granularité de l'analyse. Il est par exemple possible d'envisager de considérer l'ensemble des réseaux au niveau macroscopique, un réseau ou plusieurs réseaux au niveau mésoscopique, une partie de quelques réseaux au niveau microscopique... Ces exemples sont représentés dans la Figure 88.

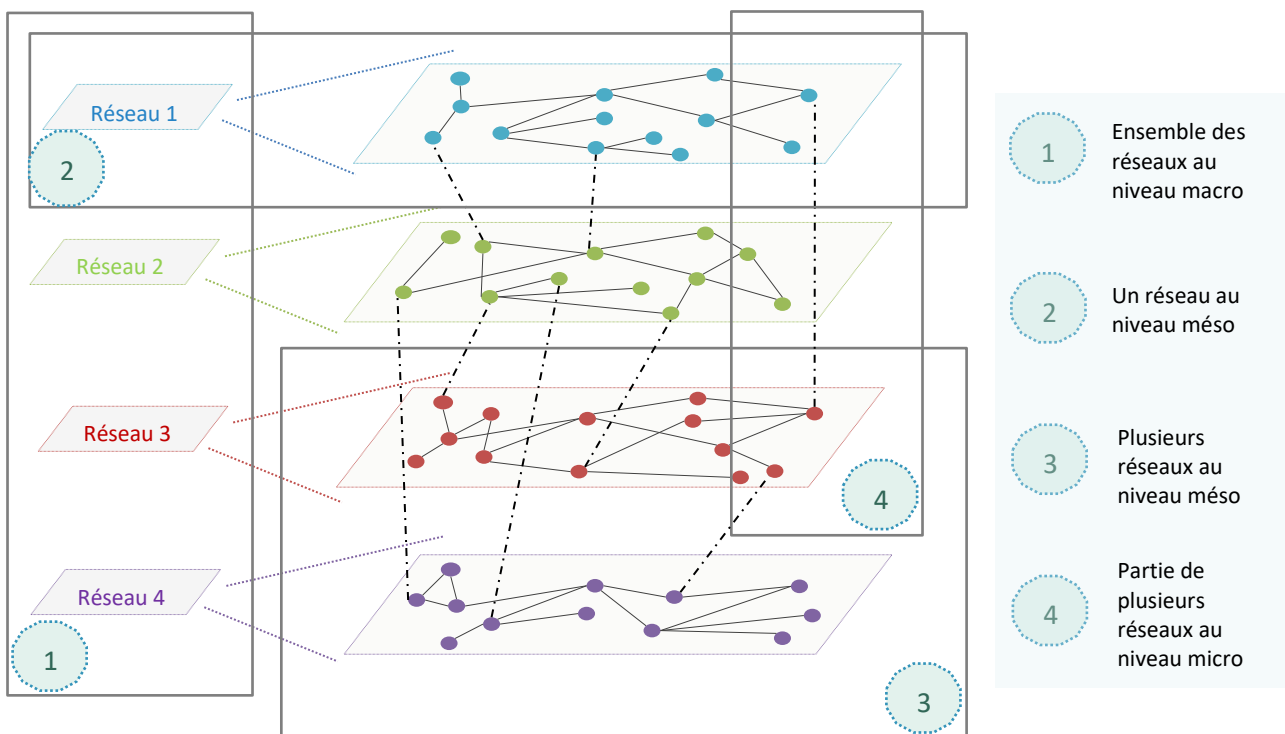


Figure 88 : Illustration de la diversité des périmètres d'analyse possibles.

Le premier scénario « ensemble des réseaux au niveau macro » correspond par exemple au spectre des travaux réalisés dans le cadre de la thèse de Toubin (2014) concernant les services urbains parisiens, tandis que le deuxième scénario intitulé « un réseau au niveau méso » correspond aux travaux se concentrant sur un réseau en particulier (Piller et al., 2017). Le scénario 3, nommé « plusieurs réseaux au niveau méso », peut alors concorder par exemple à la modélisation de deux réseaux interdépendants (Fotouhi et al., 2017), tandis que le quatrième, « partie de plusieurs réseaux au niveau micro » peut par exemple correspondre à la modélisation des infrastructures dans un périmètre restreint pour quelques réseaux particuliers (Rome et al., 2009).

### 6.3.2. L'identification de profils-types

Les travaux menés permettent d'avancer que l'amélioration de la compréhension et de la connaissance des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade peut être réalisée par divers moyens. Les méthodologies et techniques utilisées, les périmètres des analyses, la granularité de celles-ci et les objectifs poursuivis sont autant de variables qui distinguent les démarches possibles.

Afin de faciliter cette distinction et d'organiser les types de démarches les unes par rapport aux autres, une spécification générique des contextes d'application des catégories d'approches définies au chapitre 4 est proposée. Des profils-types de démarche sont également proposés par la suite, afin de potentiellement guider le processus de choix.

#### 6.3.2.1. Spécification des approches ascendante, descendante et fédératrice

Les différents retours d'expériences concernant les initiatives menées à travers le monde ces dernières années nous donnent des indications concernant les caractéristiques de mise en œuvre relevant d'approches ascendantes, descendantes ou fédératrices. Ces caractéristiques reprennent les facteurs scientifiques et opérationnels identifiés plus haut. Il convient de préciser que ces éléments sont des indications générales. Les démarches et leurs processus d'implémentation sont en effet très variés et parfois difficiles à quantifier et comparer. De plus, le nombre de cas de références est assez réduit, et des exceptions peuvent toujours exister.

Les approches de type ascendant sont généralement celles qui nécessitent le moins de données techniques, et qui peuvent être appliquées sur les zones les plus étendues. Elles ont la capacité de prendre en compte les différents types de réseaux techniques selon les collaborations mises en place entre les parties prenantes. Et elles peuvent se contenter d'une granularité assez grossière et d'un temps de mise en route plus limité, bien que conséquent.

Les approches de type descendant sont habituellement plus demandeuses en termes de données et de ressources. Elles sont généralement appliquées sur des zones plus restreintes ou sur un nombre de systèmes (généralement au niveau de l'infrastructure) plus limité.

Les approches fédératrices nécessitent quant à elles un contexte particulier, concernant notamment le monitoring et les données disponibles, les outils métiers en place, les ressources techniques, organisationnelles, budgétaires et humaines disponibles. Celles-ci sont plus lourdes à mettre en œuvre.

Les éléments de cette spécification, qui suit les tendances générales et ne peut être considérée comme exhaustive et représentative de la totalité des initiatives, sont synthétisés dans le Tableau 31.

Tableau 31 : Spécifications génériques des approches ascendantes, descendantes et fédératrices.

|   | ASCENDANTE                     | DESCENDANTE                             | FEDERATRICE                                       |
|---|--------------------------------|---|---|
| Niveau de détails des résultats   | Niveau moyen                   | Niveau élevé                            | Niveau très élevé                                 |
| Zone d'étude sélectionnée   | Zone potentiellement étendue ? | Zone restreinte (quartier?)             | Zone assez restreinte, et monitorée               |
| Réseaux urbains implantés   | Tous types                     | Réseaux techniques                      | Réseaux techniques automatisés                    |
| Outils métiers utilisés   |                                | Outils métiers potentiellement en place | Outils métiers et simulateurs sectoriels en place |
| Volonté et motivation nécessaire des décideurs                                      | Moyenne                        | Importante                              | Très importante                                   |
| Niveau de connaissances mobilisable par les décideurs                               |                                | Niveau élevé                            | Niveau très élevé                                 |
| Niveau de détails et quantité des données disponibles                               | Niveau moyen (service)         | Niveau élevé (infrastructures)          | Niveau très élevé (infrastructures ou composants) |
| Temps disponible pour la mise en place de la démarche                               | Plusieurs mois                 | Plus d'un an                            | Plusieurs années                                  |
| Ressources humaines et budgétaires disponibles pour la mise en place de la démarche | Raisonnables                   | Importantes                             | Très importantes                                  |
| Niveau d'implication potentiel des gestionnaires                                    | Niveau moyen                   | Niveau élevé                            | Niveau très élevé                                 |

### 6.3.2.2. Identification de profils-types de démarches

Il a été souligné que la recherche d'une perspective unique concernant des scénarios complexes relatifs à des systèmes de systèmes complexes et interdépendants peut être réductrice (Flammini et al., 2009). Il a par ailleurs été démontré que le développement d'une solution unique et universelle pour l'analyse et la modélisation des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade est aujourd'hui difficilement atteignable. Il peut alors être intéressant de prendre en compte de multiples représentations de la même réalité, chacune consacrée à mettre en évidence un type de phénomène (Oliva et al., 2012).

L'objectif n'est pas ici de débattre à propos des « meilleures » démarches, mais plutôt de discuter des contextes dans lesquels les différentes démarches existantes peuvent être adaptées et pertinentes. Il est en effet envisageable de développer plusieurs démarches, chacune construite pour répondre à un objectif particulier, et ce dans un contexte donné. Les résultats obtenus peuvent ensuite être mis en relation, par exemple par combinaison, comparaison, voire par leur utilisation en tant qu'entrée d'une autre démarche.

La construction d'un arbre de décisions a été envisagée pour l'aide au choix d'une démarche selon les caractéristiques du contexte. Mais ce format nous est finalement apparu réducteur par rapport à la complexité du sujet et du processus de choix. Les différentes caractéristiques à prendre en compte sont en effet difficilement quantifiables de façon exhaustive, et demeurer dans le domaine du qualitatif ne permet pas de discriminer les différentes approches de façon à les positionner dans un arbre de décisions. De plus, les démarches étudiées sont souvent flexibles et adaptables (au niveau de la granularité, des données prises en compte, des échelles etc.) et ne correspondent pas qu'à un seul contexte de mise en œuvre.

C'est pourquoi nous avons choisi de nous concentrer sur les objectifs opérationnels poursuivis comme discriminant entre les approches identifiées, et non sur les caractéristiques du contexte de mise en œuvre. Ce sont les résultats attendus par les porteurs de la démarche qui détermineront les caractéristiques de la démarche à mettre en œuvre – en accord avec les possibilités du contexte de mise en œuvre - et non les caractéristiques du contexte qui détermineront la « démarche la plus poussée envisageable ». Cette vision peut d'ailleurs permettre une meilleure acceptation par les parties prenantes, et la limitation du phénomène de déconnexion entre les démarches mises en œuvre et les dynamiques du territoire considéré.

Afin de faciliter la tâche aux parties prenantes locales cherchant à instaurer une démarche d'identification et de modélisation des réseaux (inter)dépendants au sein de leur contexte local, des profils-types de démarches sont proposés, afin de potentiellement orienter le choix dans un contexte donné.

Ces profils se basent sur les caractéristiques suivantes :

- L'objectif opérationnel poursuivi
- Les types de résultats attendus et leur format
- Les étapes d'étude des phénomènes correspondantes (présentées dans le Tableau 14)
- Les systèmes considérés et la granularité de l'étude
- Les données nécessaires en entrée
- Les conditions de mise en œuvre de la démarche
- Des exemples d'outils et de méthodes envisageables

Les différents profils proposés sont présentés ci-dessous sous forme de tableaux, dans un esprit de clarté et de synthèse, et pour faciliter la comparaison. Ceux-ci sont introduits par une description argumentée et illustrés par des exemples tirés de notre état de l'art.

*Profil 1 : Réaliser un diagnostic global des réseaux techniques urbains, identifier de nouvelles (inter)dépendances.*

L'objectif du premier profil identifié est la réalisation d'un diagnostic global des réseaux techniques urbains, avec l'identification de relations d'(inter)dépendances encore inconnues. Ce type d'approche – principalement holistique, ascendante et empirique - peut permettre la construction d'une cartographie fonctionnelle des réseaux et de leurs relations. Les systèmes considérés par ces approches sont l'ensemble des réseaux urbains, dont chacun est considéré comme un système unique global et n'est donc pas décomposé. Un formalisme commun est utilisé, ainsi qu'une trame d'analyse systémique. Il est envisageable d'appliquer des modèles fonctionnels ou des matrices de cotation (Barreiro et al., 2017), des modèles économiques de type IOM (Haines et al., 2005), ou des bases de données orientées graphe (Van Ruiten et al., 2016) par exemple.

Les données nécessaires en entrée relèvent principalement de l'expertise générale, des potentiels retours d'expérience, et des données disponibles en libre accès concernant les relations fonctionnelles entre les réseaux. La récolte de données supplémentaires peut se faire si besoin par le biais d'ateliers collaboratifs et d'exercices, mais aussi d'interviews d'experts. L'implication des parties prenantes reste raisonnable à condition qu'un porteur central soit identifié, et le processus de mise en place peut durer quelques mois.

Tableau 32 : Description du profil 1.

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| Objectif                           | Réaliser un diagnostic global des réseaux techniques urbains, identifier de nouvelles (inter)dépendances.   |
| Résultats attendus                 | Cartographie fonctionnelle des réseaux et de leurs relations macroscopiques. Possibilité de ne pas utiliser de modélisation en tant que telle, ou une modélisation macroscopique économique ou fonctionnelle.   |
| Etapas                             | Identification des (inter) dépendances ; formalisation des (inter) dépendances.   |
| Approche correspondante            | Approche holistique, ascendante et empirique.   |
| Systèmes considérés et granularité | Les systèmes considérés sont l'ensemble des réseaux techniques, avec une granularité macroscopique au niveau des entités « réseaux ».   |
| Données nécessaires                | Les données nécessaires relèvent de l'expertise générale, des retours d'expérience, des données en libre accès sur les relations fonctionnelles entre les réseaux. La récolte de données supplémentaires peut se faire par ateliers collaboratifs et exercices, interviews d'experts. |
| Conditions de mise en œuvre        | Implication raisonnable des parties prenantes, quelques mois de mise en place à prévoir, besoin d'un porteur central.   |
| Exemples d'outils et méthodes      | Utilisation d'une trame systémique et d'un formalisme partagé. Possibilité d'appliquer des modèles fonctionnels, des modèles de type IOM, ou des bases de données orientées graphe.   |

*Profil 2 : Identifier les nœuds critiques d'un réseau.*

L'objectif principal des démarches correspondant au deuxième profil est l'identification des nœuds critiques d'un réseau particulier, par la modélisation de la topologie du réseau et de la propagation des impacts de la suppression de certains nœuds ou arcs. Ces approches sont principalement descendantes, et peuvent aller jusqu'à la production d'éléments pour l'aide à la décision. Elles considèrent les infrastructures (ou les groupes d'infrastructures ou les composants, selon la granularité choisie) du réseau analysé. Il est possible d'appliquer la théorie des graphes (Lhomme et al., 2011b) ou les réseaux de Pétri (Gursesli & Desrochers, 2003) par exemple.

Les données d'entrée portent sur la nature, les caractéristiques des infrastructures et des liens entre elles, ainsi que sur l'organisation spatiale, physique et logique du réseau. Pour l'obtention de celles-ci, l'expertise sectorielle, les bases de données et les outils métiers peuvent être mis à contribution. Une implication forte des acteurs concernés est nécessaire (notamment si le réseau est géré par plusieurs entités distinctes) avec la coordination par un porteur technique. On souligne par ailleurs des difficultés opérationnelles relatives au besoin d'accès à des données techniques, à la longueur de la mise en place, et au nombre important de données à traiter.

Tableau 33 : Description du profil 2.

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| Objectif                           | Identifier les nœuds critiques d'un réseau.  |
| Résultats attendus                 | Modélisation de la topologie du réseau, et de la propagation des impacts de la suppression de certains éléments.   |
| Étapes                             | Identification des (inter) dépendances ; formalisation des (inter) dépendances ; modélisation des relations d'(inter)dépendances et des défaillances en cascade induites ; simulation de scénarios de défaillances ; aide à la décision.   |
| Approche correspondante            | Approche descendante.  |
| Systèmes considérés et granularité | Les éléments considérés sont les infrastructures (ou groupe d'infrastructures, voire composant éventuellement) d'un réseau donné, auxquelles correspond également le niveau de granularité.  |
| Données nécessaires                | Les données nécessaires renseignent sur la nature, les caractéristiques des infrastructures et des liens entre elles, ainsi que sur l'organisation spatiale, physique et logique du réseau. L'expertise sectorielle, les bases de données et les outils métiers peuvent être mis à contribution. |
| Conditions de mise en œuvre        | Implication et coordination forte des acteurs concernés (si réseau géré par plusieurs entités), porteur technique nécessaire, accès à des données techniques, mise en place longue, traitement de nombreuses données.  |
| Exemples d'outils et méthodes      | Possibilité d'appliquer la théorie des graphes ou les réseaux de Pétri par exemple.  |

*Profil 3 : Formaliser des scénarios potentiels de défaillances en cascade.*

L'objectif des démarches du troisième profil est la formalisation de scénarios de défaillances en cascade qui pourraient survenir au sein des différents réseaux considérés, à la suite des aléas envisagés. Les approches peuvent être ascendantes ou descendantes selon les contextes et considèrent les infrastructures du ou des réseaux considérés, et potentiellement leurs composants selon la granularité de l'étude. Il est possible d'utiliser des bases de données relationnelles, des matrices de cotation à double entrées, de formaliser des scénarios par le biais de méthodes de sûreté de fonctionnement adaptées (Lhomme, 2012), voire d'utiliser les réseaux Bayésiens (Liu et al., 2015) pour des modélisations probabilistes.

Les données demandées en entrée portent sur les événements initiateurs envisagés, les conditions de fonctionnement des infrastructures, les évolutions potentielles de leur comportement, les enchaînements logiques d'événements... Pour la collecte d'informations, l'expertise sectorielle, les bases de données et les outils métiers peuvent être mis à contribution, ainsi que des interviews ciblées. La mise en œuvre peut rencontrer des difficultés opérationnelles relatives au processus de mise en place, au besoin de données nombreuses, à la nécessité de choisir des hypothèses peuvent être soulevées. Une implication forte des gestionnaires des réseaux considérés est attendue.

Tableau 34 : Description du profil 3.

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| Objectif                           | Formaliser des scénarios potentiels de défaillances en cascade.   |
| Résultats attendus                 | Formalisation de scénarios de défaillance en cascade au sein des infrastructures des réseaux considérés, à la suite des aléas envisagés. Possibilité d'y associer des notions de vraisemblance si les données associées aux probabilités des événements considérés sont disponibles.  |
| Etapes                             | Identification des (inter) dépendances ; formalisation des (inter) dépendances ; modélisation des relations d'(inter)dépendances et des défaillances en cascade induites.   |
| Approche correspondante            | Approche ascendante ou descendante.   |
| Systèmes considérés et granularité | Les infrastructures du ou des réseaux pris en compte, voire leurs composants si leur comportement peut influencer sur les scénarios, doivent être considérés.   |
| Données nécessaires                | Les données portent sur les événements initiateurs envisagés, les conditions de fonctionnement des infrastructures, les évolutions potentielles de leur comportement, les enchaînements logiques d'événements... L'expertise sectorielle, les bases de données et les outils métiers peuvent être mis à contribution, ainsi que des interviews ciblées. |
| Conditions de mise en œuvre        | Définition de scénarios d'aléas ou événements redoutés, accès à de nombreuses données essentiel, choix d'hypothèses souvent nécessaire, implication forte des gestionnaires des réseaux considérés. Processus potentiellement laborieux.  |
| Exemples d'outils et méthodes      | Possibilité d'utiliser des bases de données relationnelles, des matrices de cotation à double entrées, de formaliser des scénarios par le biais de méthodes de sûreté de fonctionnement adaptées, voire d'utiliser les réseaux Bayésiens pour des modélisations probabilistes.  |



*Profil 4 : Identifier des zones géographiques sensibles et vulnérables à un événement initiateur donné.*

L'objectif principal du quatrième profil est l'identification de zones géographiques particulièrement sensibles et vulnérables à un événement initiateur donné. Ce type d'approche permet d'obtenir une cartographie des zones susceptibles de connaître des défaillances de plusieurs réseaux en cascade selon les événements considérés et les propagations spatiales et temporelles des impacts attendus. Les approches peuvent être ascendantes ou descendantes, et leur granularité peut varier du groupement d'infrastructures au composant, selon la précision spatiale attendue. Les infrastructures considérées sont ponctuelles mais aussi linéaires, et les zones qu'elles desservent sont également prises en compte. Un couplage faible de simulateurs sectoriels déjà utilisés par les gestionnaires (Grangeat, 2017) est envisageable, ou un couplage de cartographies de vulnérabilité (Bocquentin et al., 2020)

Il est nécessaire d'obtenir des données sur les scénarios des événements initiateurs considérés et leur périmètre d'action, les vulnérabilités des infrastructures étudiées, les liens de dépendances qu'elles entretiennent, les périmètres des zones desservies par chacune... L'expertise sectorielle et les outils métiers peuvent être mis à contribution, ainsi que des cartographies de vulnérabilité selon les scénarios d'aléas étudiés. Des exercices de simulation peuvent également être mis en place pour compléter les informations. Le choix d'hypothèses est souvent nécessaire, notamment au niveau des liens physiques (et non plus génériques) entre les infrastructures, et au niveau des zones desservies par chaque infrastructure. Une implication forte des gestionnaires des réseaux participants est nécessaire, et les résultats impliquant des zones urbaines réelles soulève la question de la sensibilité des résultats obtenus.

Tableau 35 : Description du profil 4.

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| Objectif                           | Identifier des zones géographiques sensibles et vulnérables à un événement initiateur donné.  |
| Résultats attendus                 | Cartographie des zones géographiques susceptibles de connaître des défaillances de plusieurs réseaux en cascade selon les scénarios d'événements initiateurs considérés et les propagations spatiales des impacts.  |
| Etapes                             | Identification des (inter) dépendances ; formalisation des (inter) dépendances ; modélisation des relations d'(inter)dépendances et des défaillances en cascade induites.   |
| Approche correspondante            | Approche ascendante, descendante, ou fédératrice.   |
| Systèmes considérés et granularité | La granularité peut varier du groupe d'infrastructures au composant, selon la précision spatiale attendue. Les systèmes considérés sont les infrastructures ponctuelles et linéaires (et leurs composants) et les zones qu'elles desservent.  |
| Données nécessaires                | Données sur les scénarios des événements initiateurs et leur périmètre, les vulnérabilités des infrastructures étudiées, les liens de dépendances, les zones desservies par chacune... L'expertise sectorielle, des exercices spécifiques et les outils métiers peuvent être mis à contribution, ainsi que des cartographies de vulnérabilité selon les scénarios étudiés.          |
| Conditions de mise en œuvre        | Définition de scénarios redoutés, choix d'hypothèses souvent nécessaire (notamment pour les liens physiques (et non plus génériques) entre les infrastructures et pour les zones desservies par chaque infrastructure), implication forte des gestionnaires des réseaux participants. Question de la sensibilité des résultats de simulation impliquant des zones urbaines réelles. |
| Exemples d'outils et méthodes      | Il est possible de réaliser un couplage faible de simulateurs sectoriels déjà utilisés par les gestionnaires, ou un couplage de cartographies de vulnérabilité.   |

*Profil 5 : Prévoir les dommages potentiels d'un événement initiateur donné.*

L'objectif principal des approches de ce cinquième profil est la prévision des dommages potentiels d'un événement initiateur donné en considérant les cascades potentielles. Les résultats peuvent avoir la forme d'évaluations quantifiées selon les coûts des dommages structurels, selon les temps de dysfonctionnement, selon les coûts des arrêts de service... Ces approches sont généralement descendantes ou fédératrices, et les systèmes considérés sont les infrastructures des réseaux contenues dans le périmètre de l'analyse (potentiellement aussi celles à l'extérieur qui leur sont liées), ainsi que les enjeux que ceux-ci desservent. Il est possible d'appliquer des techniques de couplage faible entre plusieurs outils sectoriels déjà utilisés grâce notamment à des systèmes multi-agents (Gorbil & Gelenbe, 2009), d'utiliser des modélisations économiques, de coupler des courbes de fragilité / vulnérabilité et des bases de données relationnelles (Laker, 2018), ou d'utiliser des systèmes experts adossés à des bases de données relationnelles et les principes de la dynamique des systèmes (Bush et al., 2005a). Il est nécessaire de récolter (selon les dimensions d'analyse choisies) des données concernant les vulnérabilités des infrastructures (physiques notamment) aux aléas considérés, ou des estimations des temps de propagation et de dysfonctionnement mais aussi de remise en service, voire des évaluations des coûts indirects et combinés. La mise en œuvre de ces approches nécessite la définition de nombreuses hypothèses (sur les liens, les vulnérabilités, les propagations...), au traitement de données très nombreuses et de formats multiples sont soulevées. L'implication très forte des gestionnaires de réseaux mais aussi des gestionnaires des enjeux considérés et impactés est attendue. Par ailleurs, la sensibilité des résultats des évaluations est à bien prendre en compte.

Tableau 36 : Description du profil 5.

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| Objectif                           | Prévoir les dommages potentiels d'un événement initiateur donné.  |
| Résultats attendus                 | Les résultats peuvent avoir la forme d'évaluations quantifiées selon les coûts des dommages structurels, selon les temps de dysfonctionnement, selon les coûts des arrêts de service...   |
| Etapes                             | Identification des (inter) dépendances ; formalisation des (inter) dépendances ; modélisation des relations d'(inter)dépendances et des défaillances en cascade induites ; simulation de scénarios de défaillances.   |
| Approche correspondante            | Approche descendante ou fédératrice.  |
| Systèmes considérés et granularité | Les systèmes considérés sont les infrastructures des réseaux contenues dans le périmètre de l'analyse (potentiellement aussi celles à l'extérieur qui leur sont liées), et les enjeux que ceux-ci desservent.   |
| Données nécessaires                | Données concernant les vulnérabilités des infrastructures (physiques notamment) aux aléas considérés, ou des estimations des temps de propagation et de dysfonctionnement mais aussi de remise en service, voire des évaluations des coûts indirects et combinés.   |
| Conditions de mise en œuvre        | Définition de scénarios d'aléas ou événements redoutés, définition de nombreuses hypothèses (sur les liens, les vulnérabilités, les propagations...) souvent nécessaire, traitement de données très nombreuses et de formats multiples. Implication très forte des gestionnaires de réseaux mais aussi des gestionnaires des enjeux considérés et impactés. Question de la sensibilité des résultats des évaluations. |
| Exemples d'outils et méthodes      | Possibilité d'appliquer des techniques de couplage faible entre outils sectoriels, d'utiliser des modélisations économiques, de coupler des courbes de fragilité / vulnérabilité et des bases de données relationnelles, ou d'utiliser des systèmes experts adossés à des bases de données relationnelles et les principes de la dynamique des systèmes.  |

*Profil 6 : Prévoir les évolutions en gestion de crise, identifier les infrastructures à surveiller au sein de multiples réseaux.*

L'objectif principal du sixième profil est la prévision des évolutions de la situation en temps de crise, afin d'identifier les infrastructures à surveiller au sein de multiples réseaux notamment. Cela passe donc par la modélisation des phénomènes physiques et des flux parcourant les réseaux, qui évoluent selon les changements constatés ou estimés en leur sein. Ces approches peuvent être descendantes ou fédératrices, et considèrent les infrastructures appartenant aux réseaux surveillés avec une granularité dépendante des outils sur lesquels est basée la démarche. Il est possible de mettre en commun ou de fédérer des outils sectoriels déjà utilisés par les gestionnaires de réseaux grâce à la création d'un module central (Beyer et al., 2010), ou d'utiliser des systèmes multi-agents (Gorbil & Gelenbe, 2009) ou même la dynamique des systèmes.

Au niveau des données d'entrée, il est nécessaire d'avoir accès aux résultats des outils et simulateurs sectoriels en place, et à des données techniques et physiques détaillées ; ainsi que des données concernant les aléas et événements initiateurs considérés et le contexte d'étude. La prise en compte des incertitudes est envisageable. La mise en œuvre nécessite par ailleurs une participation forte des gestionnaires, le partage et le traitement de nombreuses données, un processus d'implémentation long et exigeant, ainsi que la définition d'hypothèses pour pallier le manque de connaissances.

Tableau 37 : Description du profil 6.

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| Objectif                           | Prévoir les évolutions en gestion de crise, identifier les infrastructures à surveiller au sein de multiples réseaux.  |
| Résultats attendus                 | Les phénomènes physiques et les flux sont modélisés, et peuvent évoluer selon les changements constatés ou estimés au sein des réseaux et de leurs infrastructures.  |
| Etapes                             | Identification des (inter) dépendances ; formalisation des (inter) dépendances ; modélisation des relations d'(inter)dépendances et des défaillances en cascade induites ; simulation de scénarios de défaillances.  |
| Approche correspondante            | Approche descendante ou fédératrice.   |
| Systèmes considérés et granularité | Les systèmes considérés sont les infrastructures appartenant aux réseaux techniques urbains surveillés. La granularité dépend des outils sur lesquels est basée la démarche, mais elle peut aller jusqu'au composant.                                      |
| Données nécessaires                | Il est nécessaire d'avoir accès aux résultats des outils et simulateurs sectoriels en place, et à des données techniques et physiques détaillées ; ainsi que des données concernant les aléas et événements initiateurs considérés et le contexte d'étude. |
| Conditions de mise en œuvre        | Participation forte des gestionnaires, partage et traitement de nombreuses données, processus d'implémentation long et exigeant, définition d'hypothèses pour pallier le manque de connaissances. Prise en compte des incertitudes.                        |
| Exemples d'outils et méthodes      | Possibilité de mettre en commun ou de fédérer des outils sectoriels déjà utilisés par les gestionnaires de réseaux grâce à la création d'un module central, possibilité d'utiliser des systèmes multi-agents ou la dynamique des systèmes.                 |

*Profil 7 : Prioriser des mesures techniques et des solutions palliatives au sein d'un réseau donné.*

L'objectif principal des approches de ce septième profil est la priorisation de mesures techniques et de solutions palliatives au sein d'un réseau donné, et ce souvent pour un type d'aléa. Ce type d'approche permet d'apporter des éléments d'aide à la décision sur le plan financier (quelle solution fait économiser le plus), technique (quelle solution protège le mieux le réseau et ses infrastructures), ou fonctionnelle (quelle solution a l'impact le plus positif sur la continuité d'activité et le service aux usagers). Ce sont généralement des approches descendantes, qui considèrent les infrastructures appartenant au réseau technique considéré, ainsi que les infrastructures ayant un lien de dépendance avec celles-ci. La granularité correspond aux infrastructures ou aux composants si besoin. Des analyses de type « what-if » sur des simulations multi-agents, des simulations basées sur la dynamique des systèmes, des simulations économiques (NSW Government, 2018), ou des graphes (Rozel, 2009) peuvent être utilisés...

Les données d'entrées sont nombreuses et concernant les infrastructures et les enjeux, elles peuvent être très diverses selon la ou les dimensions d'analyse choisies. La prise en compte des incertitudes est envisageable. La mise en œuvre de ce type d'approche peut se heurter au besoin d'une implication très forte du (ou des) gestionnaire(s) du réseau considéré qui doi(ven)t porter cette initiative, de la définition de nombreuses hypothèses pour pallier le manque de connaissances. Ce type de processus est exigeant et laborieux.

Tableau 38 : Description du profil 7.

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| Objectif                           | Prioriser des mesures techniques et des solutions palliatives au sein d'un réseau donné.   |
| Résultats attendus                 | Apport d'éléments pour une aide à la décision pour une priorisation, qui peut être réalisée selon la dimension financière (quelle solution fait économiser le plus), technique (quelle solution protège le mieux le réseau et ses infrastructures), fonctionnelle (quelle solution a l'impact le plus positif sur la continuité d'activité et le service aux usagers), ... |
| Etapes                             | Identification des (inter) dépendances ; formalisation des (inter) dépendances ; modélisation des relations d'(inter)dépendances et des défaillances en cascade induites ; simulation de scénarios de défaillances ; aide à la décision.   |
| Approche correspondante            | Approche descendante.  |
| Systèmes considérés et granularité | Les systèmes considérés sont les infrastructures appartenant au réseau technique considéré, ainsi que les infrastructures ayant un lien de dépendance avec celles-ci. La granularité correspond aux infrastructures ou aux composants si besoin.   |
| Données nécessaires                | Nombreuses données concernant les infrastructures et les enjeux, très diverses selon la ou les dimensions d'analyse choisies.  |
| Conditions de mise en œuvre        | Nombreuses données nécessaires, implication très forte du (ou des) gestionnaire(s) du réseau considéré qui doi(ven)t porter cette initiative, définition de nombreuses hypothèses pour pallier le manque de connaissances. Processus exigeant et laborieux. Prise en compte des incertitudes.  |
| Exemples d'outils et méthodes      | Possibilités d'appliquer des analyses de type « what-if » sur des simulations multi-agents, des simulations basées sur la dynamique des systèmes, des simulations économiques, des graphes...  |

## 6.4. CONCLUSION

Ce chapitre explicite tout d'abord les raisons pour lesquelles une démarche idéale et universelle est difficilement envisageable à ce jour, de par les limites des modèles et simulations utilisés mais aussi de par la complexité et la dynamique du sujet. Les défis associés à la mise en œuvre au sein d'un contexte réel, discutés dans le chapitre précédent, sont également une limite supplémentaire à cet idéal.

Le processus d'analyse et de modélisation des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade est décomposé, et les facteurs scientifiques et opérationnels occupant une place importante dans le choix et la construction d'une telle démarche sont ensuite identifiés et argumentés. Ils permettent de souligner l'influence du contexte et la nécessité de le considérer pour garantir la réussite d'une implémentation.

Par ailleurs, les recherches menées nous amènent à proposer quelques observations concernant la construction et la mise en œuvre d'une démarche d'analyse et de modélisation des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade. Il apparaît que ces démarches doivent être pensées au sein de leurs contextes de mise en œuvre, et adaptées aux caractéristiques de ceux-ci. Elles doivent être capables de répondre aux besoins et objectifs des parties prenantes locales et ce malgré leurs contraintes, de fonctionner avec des données potentiellement très diverses et imparfaites, de s'adapter à des résolutions spatio-temporelles et des granularités variables, mais aussi de tirer parti des connaissances acquises par les acteurs locaux et des outils en place.

C'est dans cet objectif que nous proposons plusieurs profils-types de démarches, caractérisés selon les différents points mentionnés ci-dessus. Ces profils peuvent alors représenter une base pour discuter des contextes dans lesquels les différentes démarches existantes peuvent être adaptées et pertinentes.

## CONCLUSION DE LA PARTIE II

Dans un premier temps, la deuxième partie du manuscrit a permis de présenter les résultats de l'état de l'art réalisé. Celui-ci a mis en exergue le nombre et la diversité des démarches d'étude des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade qui existent aujourd'hui. Une caractérisation factuelle et descriptive des initiatives de notre échantillon a permis de dresser un premier panorama des démarches existantes pour les parties prenantes opérationnelles.

L'analyse et la critique des taxonomies existantes pour catégoriser ces démarches nous a amené à proposer une typologie basée sur des caractéristiques plus opérationnelles, notamment les processus de mise en œuvre. Cette typologie se décompose en trois catégories : les approches ascendantes, descendantes et fédératrices.

Dans un second temps, la mise en œuvre opérationnelle d'une démarche d'analyse et de modélisation des (inter)dépendances et défaillances en cascade a été analysée. Ces travaux ont souligné l'importance de l'implication et de la participation des parties prenantes locales, les difficultés relatives aux informations à renseigner et la question de la granularité de l'étude et du type de systèmes considérés. Finalement, il semble qu'une démarche unique, idéale et transposable est aujourd'hui difficilement envisageable.

L'identification de facteurs théoriques et contextuels dans le choix et la construction d'une approche a également permis de souligner l'influence du contexte et la nécessité de le considérer pour garantir la réussite d'une mise en œuvre. Les recherches menées nous amènent à considérer que ces démarches doivent être pensées dans leurs contextes de mise en œuvre, et adaptées aux caractéristiques de ceux-ci. Différents profils-types de démarches sont ainsi proposés pour servir de bases aux réflexions lors du choix ou de la construction d'une initiative dans un contexte donné.

Nous pouvons alors appliquer les enseignements de ces deux premières parties et utiliser les outils et cadres établis à notre zone d'étude, à savoir l'agglomération parisienne face à une crue majeure de la Seine. La troisième partie permet alors de réaliser un diagnostic de ce contexte grâce aux conclusions des travaux précédents et à la grille d'analyse proposée. Ce diagnostic permet d'identifier différentes réflexions et actions à mener pour améliorer la prise en compte et la prévision des (inter)dépendances et des défaillances en cascade au sein des réseaux techniques urbains, notamment grâce aux profils-types proposés.

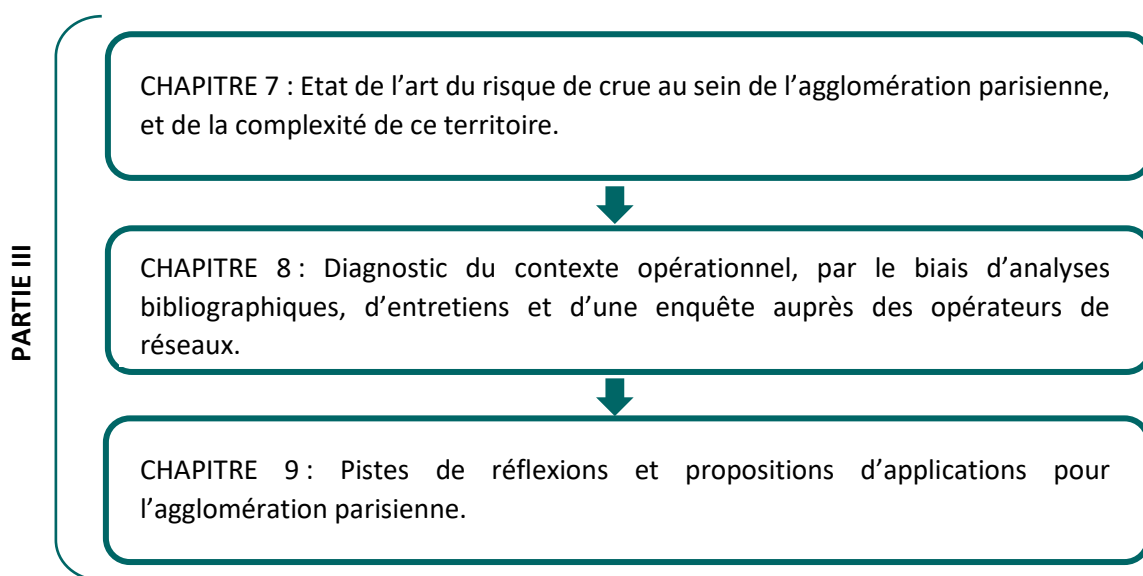
PARTIE III - LES RESEAUX DE  
L'AGGLOMERATION PARISIENNE  
FACE A UNE CRUE MAJEURE :  
ENJEUX, DIAGNOSTIC ET  
PROPOSITIONS

## PREAMBULE DE LA PARTIE III

La première partie du manuscrit nous a permis de présenter les phénomènes d’(inter)dépendances et de défaillances en cascade au sein des réseaux techniques urbains, leurs enjeux et les problématiques associées. Dans la seconde partie, nous avons abordé la question de la prévision et de la modélisation des ces phénomènes. Face aux défis posés par la mise en œuvre opérationnelle, la question du choix d’une démarche appropriée pour un contexte donné a été analysée, dans l’objectif de soutenir le choix des décideurs locaux.

La troisième et dernière partie se concentre quant à elle sur notre contexte d’étude, à savoir l’agglomération parisienne face à une crue majeure de la Seine. Elle propose un panorama et un diagnostic de la situation actuelle concernant la problématique des réseaux techniques urbains. L’objectif est alors de renseigner la grille d’analyse proposée dans la partie II pour construire un diagnostic approprié de la situation, afin de permettre l’émission de propositions adaptées. Cette partie permet tout d’abord d’analyser notamment le contexte, les parties prenantes, les réseaux techniques urbains, les dynamiques en place, et les ressources disponibles pour introduire différentes réflexions à mener et quelques propositions d’actions considérées comme pertinentes.

Cette dernière partie a donc pour ambition d’apporter des éléments de diagnostic et des propositions pour améliorer la prise en compte et la prévision des (inter)dépendances et des défaillances en cascade au sein des réseaux techniques urbains. Pour cela, une analyse de l’agglomération en elle-même et du risque de crue est réalisée dans le chapitre 7. Ce chapitre permet notamment de discuter de la complexité de ce territoire, de par son organisation administrative, de par les enjeux qu’il contient, mais aussi de par les nombreuses parties prenantes impliquées sur notre problématique. Un diagnostic détaillé de la situation est ensuite réalisé dans le chapitre 8. Ce chapitre s’intéresse à nos objets d’étude que sont les réseaux techniques urbains franciliens et à leur gestion, aux dynamiques en place et aux ressources disponibles. Il s’appuie notamment sur des rencontres avec les parties prenantes et une enquête auprès des opérateurs de réseaux. Finalement le neuvième et dernier chapitre introduit différentes réflexions qui pourront être menées à la suite, ainsi que des propositions d’actions considérées comme pertinentes.





## CHAPITRE 7 : L'AGGLOMERATION PARISIENNE FACE AU RISQUE DE CRUE MAJEURE

Ce chapitre 7 a pour objectif d'introduire notre contexte d'étude, à savoir l'agglomération parisienne, et sa situation face aux risques de crues majeures. Il s'agit en effet de l'aléa le plus redouté et sans doute le plus étudié pour cette agglomération au centre d'enjeux économiques, politiques et stratégiques très importants, qui se révèle vulnérable et dépendante de ses réseaux techniques urbains. Le travail présenté ici se base principalement sur des travaux bibliographiques de recueil, d'analyse et de synthèse de l'information, mais aussi sur un retour d'expérience d'une crue centennale.

Dans le cadre de ce travail, nous présentons tout d'abord la zone d'étude, ses spécificités et ses enjeux – notamment de gouvernance. Un panorama des parties prenantes est proposé, en soulignant leur diversité et la complexité de leurs relations de dépendance. Le risque de crue et ses caractéristiques sont ensuite discutés ainsi que les généralités de l'impact potentiel de crues majeures sur l'agglomération parisienne. Ce chapitre permet ainsi de réaliser la complexité de la situation au sein de l'agglomération parisienne, que ce soit au niveau de la gouvernance du territoire, de sa vulnérabilité, des réseaux techniques présents, de l'aléa étudié ou des impacts potentiels de celui-ci sur les réseaux. Les enjeux relatifs à la problématique des réseaux urbains (inter)dépendants et des défaillances en cascade en leur sein sont ainsi soulevés et exposés. Ces analyses permettent de renseigner les premiers éléments du diagnostic proposé dans la partie II, en s'intéressant notamment à la zone d'étude, aux réseaux urbains implantés, et aux acteurs impliqués dans la problématique.

### 7.1. UN TERRITOIRE VULNERABLE AU RISQUE DE CRUE MAJEURE

#### 7.1.1. Délimitation de la zone d'étude : l'agglomération parisienne

Notre territoire d'étude est l'agglomération parisienne, au centre d'un bassin sédimentaire appelé le bassin parisien. Ce bassin a un relief relativement plat et est parcouru par la Seine, dont les principaux affluents convergent en son sein. L'agglomération parisienne –centrée sur la capitale Paris - représente la plus grande aire urbaine française tant au niveau de sa superficie que de sa population, et se trouve au cœur des enjeux et pouvoirs géopolitiques, socio-économiques et stratégiques d'une France encore très centralisée, et dans une moindre mesure de l'Union Européenne. Elle abrite ainsi le cœur du gouvernement, les sièges de nombreuses grandes entreprises, mais aussi de nombreux centres de décisions politiques, stratégiques et académiques. Cette agglomération est par ailleurs la plus dense d'Europe, avec 3800 habitants au kilomètre carré en 2014 d'après l'INSEE.

Le terme officiel utilisé par l'Insee pour désigner une agglomération est celui d'«unité urbaine» qui correspond à un ensemble bâti continu, où les différents bâtiments sont séparés de moins de 200 mètres. Selon l'INSEE, l'unité urbaine de Paris –représentée sur la Figure 89 entourée de bleu- est composée de 412 communes situées en Ile-de-France, correspond à une superficie de 2 850 km<sup>2</sup> et regroupait près de 11 millions d'habitants et 5 millions et demi d'emplois en 2016 (INSEE, 2018). Cette zone géographique n'a pas d'existence administrative ou politique et résulte seulement de critères morphologiques du bâti. Elle présente ainsi un intérêt pour l'étude des réseaux techniques urbains, qui ne tiennent pas compte des limites administratives mais plutôt de l'organisation du territoire et du bâti.

La Métropole du Grand Paris, créée par la loi n°2014-58 du 27 janvier 2014 de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles (appelée MAPAM ou MAPTAM) et modifiée par la loi portant nouvelle organisation territoriale de la République (appelée loi NOTRe) du 7 août 2015, regroupe quant à elle 130 communes. Elle correspond à la totalité des communes des départements de la petite couronne (Hauts-de-Seine, Seine-Saint-Denis et Val-de-Marne) ainsi que sept communes de la grande couronne. La métropole est peuplée de plus de 7 millions d'habitants. Les communes autres que Paris sont rassemblées en onze établissements publics territoriaux. La région Ile-de-France, fortement centralisée sur l'agglomération parisienne et située au carrefour des échanges européens et mondiaux, représente par ailleurs 31% du PIB de la France métropolitaine et 5% du PIB européen (INSEE, 2017). La région est composée des départements de Paris, Seine-et-Marne, Yvelines, Essonne, Hauts-de-Seine, Seine-Saint-Denis, Val-de-Marne et Val d'Oise. Pour plus de clarté, les périmètres géographiques et administratifs des différentes entités et intercommunalités sont représentées de façon cartographique par la Figure 89.

L'agglomération parisienne, notamment de par sa position centrale au sein de la région Ile-de-France et de la Métropole du Grand Paris, est donc un territoire critique et complexe au niveau des questions de gouvernance, de concentration des enjeux et des populations, mais aussi de gestion des réseaux techniques denses et complexes comme nous le verrons par la suite. Il recoupe par ailleurs plusieurs échelles administratives : communes, intercommunalités, départements, métropole, région.

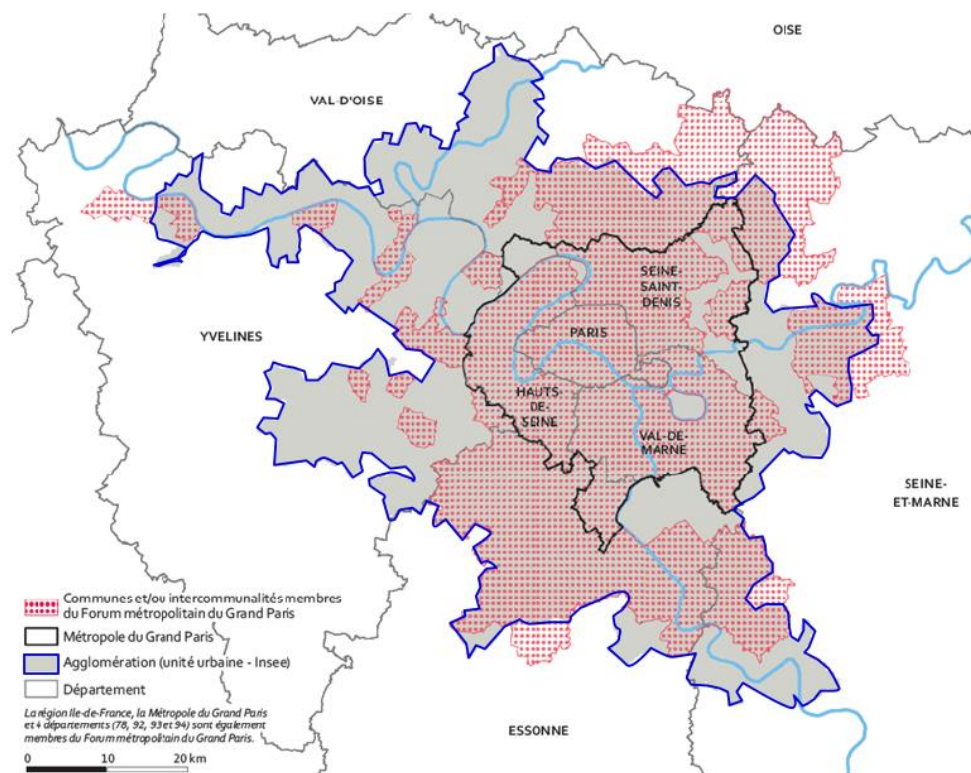


Figure 89 : Périmètres des communes membres de la Métropole du Grand Paris, du Forum métropolitain du Grand Paris et de l'agglomération parisienne. Source : (APUR, 2017).

### 7.1.2. L'aléa inondation et les scénarios de crues

L'agglomération parisienne se trouve au cœur de la confluence de la Seine et de ses affluents principaux que sont l'Yonne, la Marne et l'Oise. Le bassin versant de la Seine, inclus dans le bassin Seine-Normandie représenté par la carte de la Figure 90, draine une surface de 76000 km<sup>2</sup>, regroupe

près de 30% de la population française et est très marqué par les activités humaines. L'activité agricole et l'urbanisation sont très présentes autour des cours d'eau tandis que les forêts se font rares (Agence de l'Eau Seine-Normandie, 2013). Notre zone d'étude est ainsi exposée au risque d'inondation, dont les occurrences sont reprise dans la Figure 91, qui est le premier risque naturel en France par l'importance de ses dommages (MEDDE, 2004), notamment pour les inondations dues à des pluies exceptionnelles. On précise que l'agglomération parisienne est également exposée à d'autres aléas tels que les canicules, les orages, les tempêtes...

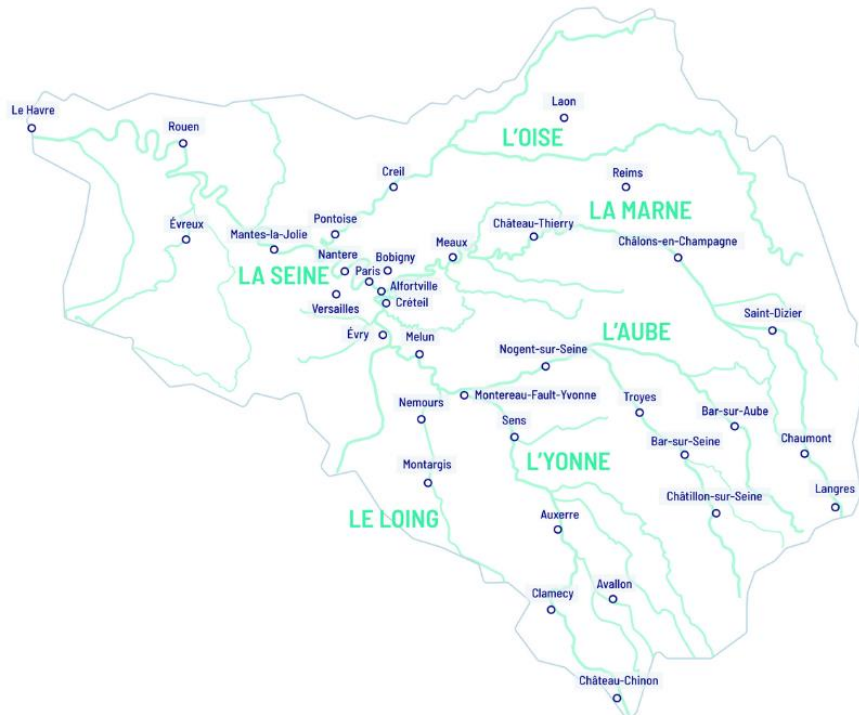


Figure 90 : Les limites du bassin Seine-Normandie. Source : <https://episeine.fr>

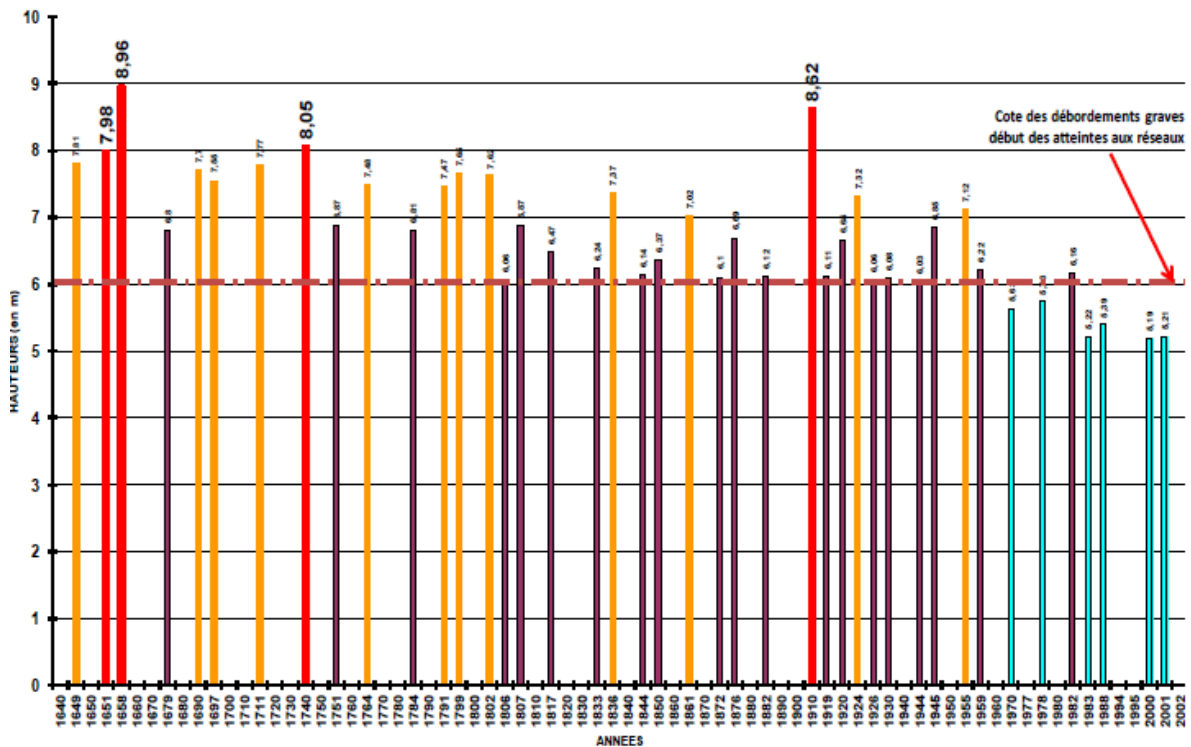


Figure 91 : Les hauteurs des crues reconstituées à la station Austerlitz entre 1640 et 2013. Source : (Seine Grands Lacs, 2019)

Le risque est particulièrement important durant la période hivernale courant de novembre à avril, en conséquence du gel des sols. Ce type de crue est à cinétique lente, et les périodes de crue - et particulièrement de décrue - des eaux peuvent alors durer plusieurs semaines (Marti & Lepelletier, 1997; OCDE, 2014). Des crues importantes peuvent cependant se produire en été et présenter une cinétique plus rapide, comme l'ont démontré les crues de mai et juin 2016.

Des scénarios de crue, basés sur la modulation d'un hydrogramme de référence qu'est celui de la crue de 1910, ont été construits par la DRIEE Ile-de-France à partir des résultats d'un modèle hydraulique nommé ALPHEE (DRIEE IDF, 2012). La modulation de l'hydrogramme se fait selon le débit et non la hauteur d'eau car les lits des fleuves ont été modifiés de façon non négligeable. Le scénario nommé R0.8 correspond par exemple à 80% du débit de la crue de 1910.

Ces scénarios ont pour objectif d'estimer l'impact des inondations à l'échelle de la région Ile-de-France à l'aide de cartographies simplifiées des zones inondées selon le débit des principaux cours d'eau de la région Ile-de-France (Seine, Marne et Oise). Ils sont utilisés aujourd'hui pour les travaux de prévision, préparation et de gestion du risque inondation, et seront également utilisés pour les travaux présentés dans ce manuscrit. Les cartes des scénarios se présentent sous deux formats, selon qu'elles se basent sur les Zones Inondées Potentielles (ZIP) ou les Zones Iso-Classe de Hauteur (ZICH). La Zone Inondée Potentielle (ZIP) représente l'étendue prévisible d'une inondation sur un secteur délimité (cf. Figure 92). Chaque ZIP correspond à une hauteur d'eau mesurée à la station de référence du Service de Prévision des Crues (SPC) à laquelle elle est rattachée. La zone d'influence d'une station est la zone dont l'inondation peut être définie en lien direct avec la hauteur à une station. On peut regrouper les hauteurs de submersion par classes de 50 cm pour obtenir une zone iso-classes de hauteur. Les ZICH correspondent alors aux ZIP pour lesquelles on aurait regroupé les hauteurs d'eau par classe pour chaque couche : de 0 à 0,5m, de 0,5 à 1m, de 1m à 1,5m, de 1,5m à 2m et supérieur à 2m.

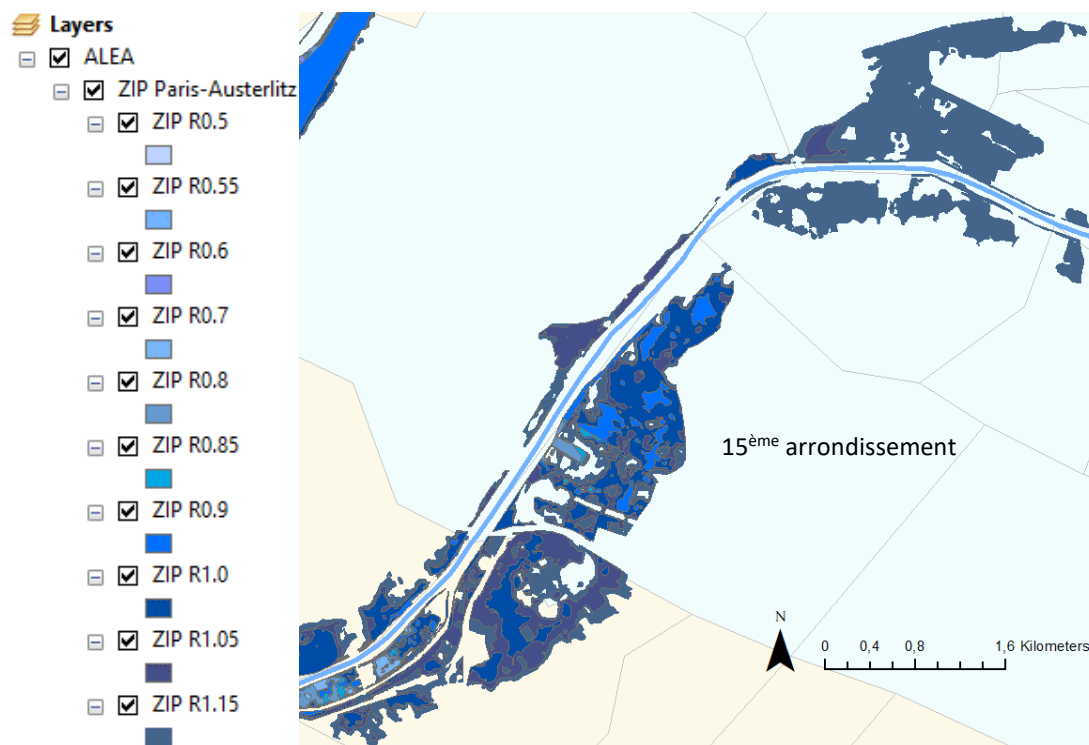


Figure 92 : Cartographie des Zones d'Inondation Potentielle pour les scénarios R0.5 à R1.15 au niveau du 15<sup>ème</sup> arrondissement de Paris, à partir de données de la DRIEE.

Ces scénarios ne prennent pas en compte les remontées de nappes, qui surviennent lorsque le niveau de la nappe atteint la zone non saturée lors de la montée du niveau de la nappe. Les zones sensibles aux remontées de nappe rassemblent les zones où une émergence de la nappe au niveau du sol ou une inondation des sous-sols à quelques mètres sous la surface du sol est possible. La prévision des remontées de nappes est actuellement difficile, d'une part car le nombre de piézomètres positionnés dans les sous-sols est insuffisant, d'autres part car il y a de nombreuses incertitudes quant à l'effet de l'aménagement du sous-sol sur les circulations souterraines, l'efficacité des pompages, et la capacité du réseau d'assainissement à évacuer ces volumes conséquents. Des études et des travaux de recherche sont en cours pour tenter de remédier à ces incertitudes (Maillot et al., 2018). Une carte des zones potentielles de remontées de nappe au niveau de notre zone d'étude est présentée à la Figure 93, mais celle-ci reste indicative et sa précision ne permet de considérer telles quelles ces informations.

Les travaux de thèse de Mathias Maillot (EPTB-Mines ParisTech) sont en cours de finalisation pour construire un modèle hydrogéologique de Paris et sa petite couronne afin d'étudier le fonctionnement des nappes en régime transitoire, en particulier lors d'un épisode de crue. S'appuyant sur la modélisation hydrogéologique de Paris établie par Aurélie Lamé dans le cadre de sa thèse (Lamé, 2013), cette étude a pour objectif l'amélioration de la connaissance des conséquences du comportement des nappes lors de crues à Paris et l'étendue du modèle aux départements de la petite couronne.

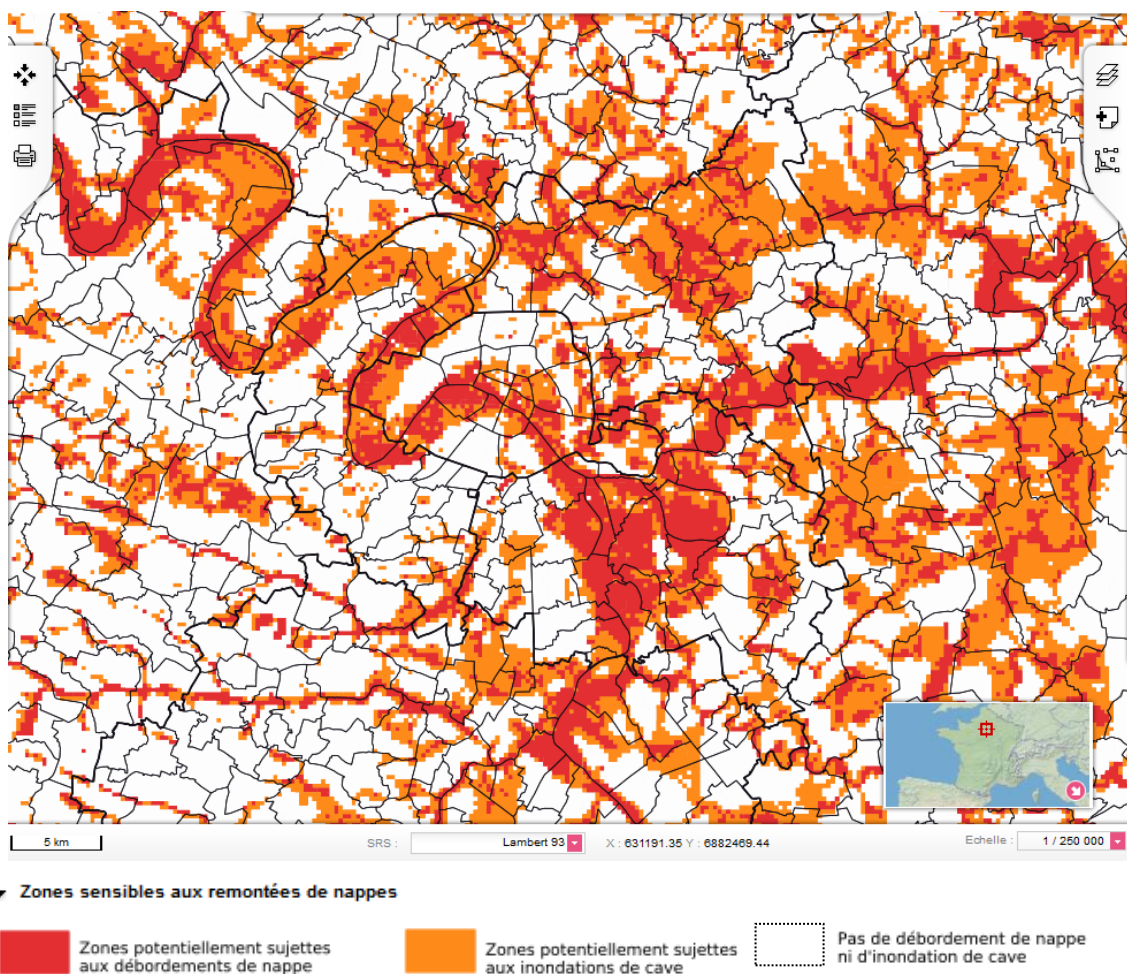


Figure 93 : Carte des zones potentielles d'inondations par remontée de nappe. Source : <http://www.georisques.gouv.fr>

### 7.1.3. La réglementation relative à l'aléa inondation : des initiatives encore basées sur le volontariat

Un expert rencontré lors de l'enquête présentée au chapitre suivant affirmait qu'un opérateur avait trois raisons de se préoccuper du risque inondation : y avoir été confronté, subir la pression des assurances, ou avoir une obligation réglementaire. Nous nous intéressons ici à ce dernier point.

L'Europe a connu au début des années 2000 de nombreuses inondations majeures et meurtrières, notamment les inondations de 2002 le long du Danube et de l'Elbe. Après des travaux et rapports produits par les Nations Unies, la Commission Européenne ainsi que par des chercheurs et experts, la Directive Inondation est signée le 23 octobre 2007 avec l'objectif de réduire et de gérer les risques engendrés par les inondations au sein d'un cadre européen commun (Directive 2007/60/CE Du Parlement Européen et Du Conseil Du 23 Octobre 2007 Relative à l'évaluation et à La Gestion Des Risques d'inondation, 2007). Elle comporte trois étapes principales : l'évaluation des risques, la cartographie de ces risques et la création de plans de gestion adéquats.

Cette Directive est par la suite déclinée sur le territoire français par le biais de lois, décrets et articles de lois, comme présenté dans le Tableau 39 ci-dessous. Aux différents échelons territoriaux correspondent différents documents réglementaires et différentes initiatives correspondantes.

Tableau 39 : Les documents réglementaires correspondant aux différents échelons territoriaux et les initiatives correspondantes pour la gestion du risque inondation.

| Echelle  | Documents réglementaires  | Initiatives   |
|--|---|---|
| Union Européenne                                 | Directive Inondation 2007/60/CE   | Déclinaison et application sur le territoire français   |
| France   | Loi LENE du 13 juillet 2010 et décret N°2011-227 du 2 mars 2011. Art. L. 566-7 et R. 566-10 à R. 566-13 du code de l'environnement.   | Evaluation préliminaire des risques (EPRI) pour l'identification des territoires à risque d'inondation important (TRI). Stratégie nationale de gestion des risques inondation (SNGRI) |
| Bassin versant                                   | Loi LENE du 13 juillet 2010 et décret N°2011-227 du 2 mars 2011. Art. L. 566-7 et R. 566-10 à R. 566-13 du code de l'environnement.   | Plan de gestion des risques inondation (PGRI)   |
| Territoire à Risque d'Inondation important (TRI) | Loi LENE du 13 juillet 2010 et décret N°2011-227 du 2 mars 2011. Art. L. 566-7 et R. 566-10 à R. 566-13 du code de l'environnement.   | Stratégie locale de gestion des risques inondation (SLGRI)  |
| Collectivités                                    | Loi LENE du 13 juillet 2010 et décret N°2011-227 du 2 mars 2011. Art. L. 566-7 et R. 566-10 à R. 566-13 du code de l'environnement.<br>Art. 56 à 59 de la loi MAPTAM de janvier 2014. | Plans d'action de prévention des inondations (PAPI)<br>Plan de prévention du risque inondation (PPRI)<br>Compétence GEMAPI  |

La Figure 94 ci-dessous retrace l'évolution temporelle des législations et actions relatives à la gestion du risque inondation. Après la phase de constat dans les années 2000, et de la mise en œuvre des mesures et préconisations durant la première moitié des années 2010, nous nous trouvons à un moment charnière d'évaluation et de révision des pratiques actuelles.

## Inondations : une action dans le temps



Figure 94 : Evolution temporelle des actions relatives à la gestion du risque inondation. Source : (MEDDE, n.d.)

Notre territoire d'étude comprend un territoire à risque important d'inondation, le TRI de la métropole francilienne dont le périmètre est représenté par la Figure 95. Il comporte cent quarante communes, réparties le long de la Seine, la Marne et l'Oise. Les collectivités territoriales reconnues comme TRI sont dans l'obligation à partir de 2017 et par cycle de 6 ans, de mener des actions pour limiter l'impact des inondations sur la santé humaine, l'environnement, le patrimoine culturel et l'activité économique.

La stratégie locale de gestion du risque inondation (SLGRI) de la métropole francilienne a été approuvée le 2 décembre 2016 (DRIEE IDF & SGZDS, 2016). Une instance de dialogue rassemblant les parties prenantes de la gestion du risque inondations a été créée sous le pilotage du Préfet de la Région d'Île-de-France et du Préfet de Police de Paris. La stratégie concerne 160 communes sélectionnées car elles sont inondables, qu'elles concernent un nombre important d'activités et d'habitants, et qu'elles risquent des pertes d'alimentation électriques importantes. Cette SLGRI définit les grands objectifs pour réduire les conséquences dommageables des inondations durant les 6 ans à venir.

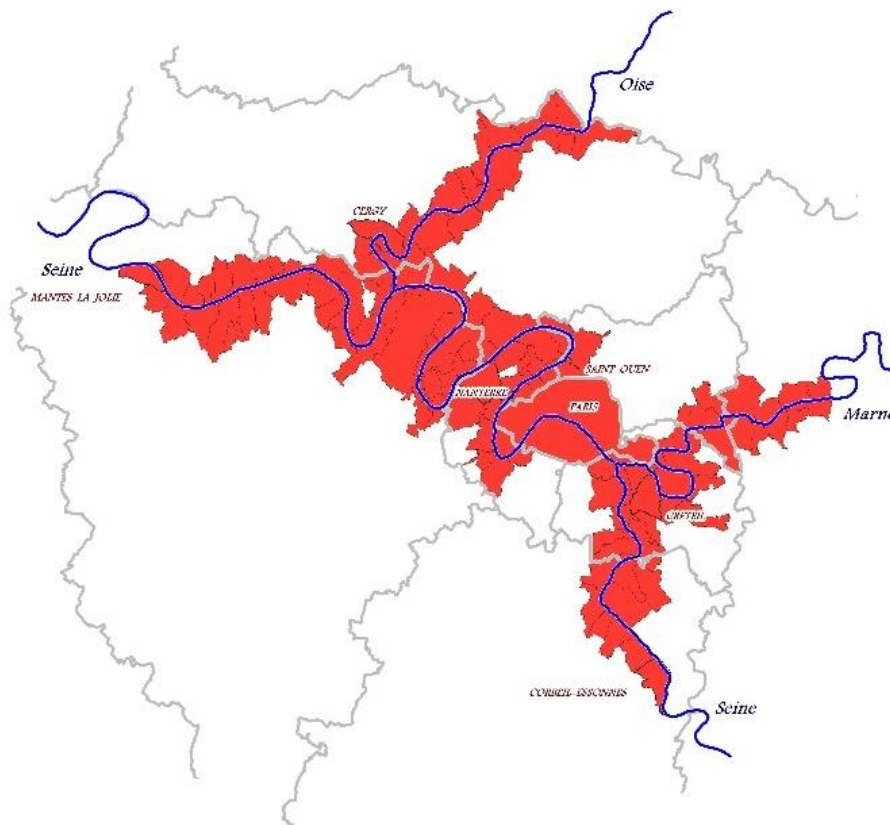


Figure 95 : Le périmètre du TRI de la métropole francilienne. Source : (DRIEE IDF, 2017)

Les plans de prévention des risques d'inondation ont quant à eux l'objectif de réglementer l'occupation et l'utilisation du sol dans les zones à risque. Ils sont élaborés par les préfetures de département en association avec les communes et en concertation avec la population puis annexés au plan local d'urbanisme de chaque commune concernée. L'ensemble des communes voisines des grands cours d'eau d'Ile-de-France possède un plan de prévention des risques d'inondation, en cours d'approbation ou approuvé. L'EPTB Seine Grands Lacs (et ses quatre départements membres que sont Paris, les Hauts-de-Seine, la Seine-Saint-Denis et le Val-de-Marne) est par ailleurs porteur d'un programme d'actions de prévention des inondations (PAPI) qui a pour but de réduire les risques d'inondation sur le territoire francilien (Seine Grands Lacs, 2019). Il s'agit de promouvoir une gestion intégrée du risque inondation afin de réduire leurs conséquences.

Nous avons par ailleurs vu dans le chapitre 5 que la loi de modernisation de la sécurité civile (LOI N° 2004-811 Du 13 Août 2004 de Modernisation de La Sécurité Civile, 2004) stipule que les opérateurs de réseaux doivent prendre les mesures nécessaires pour assurer les besoins prioritaires de la population en cas de crise. Au niveau des Zones de Défense et de Sécurité, certaines dispositions du plan ORSEC portent sur l'obligation des exploitants de réseaux d'assurer la satisfaction des besoins prioritaires par la mise en œuvre de moyen pour le rétablissement des réseaux dans les meilleurs délais. La protection des « installations d'importance vitale », qui regroupent tous les réseaux comme nous l'entendons à l'exception de celui de gestion des déchets, a quant à elle été introduite en 2004 dans le Code de la Défense avec l'obligation de mise en œuvre des mesures du Plan Particulier de Protection (*Code de La Défense. | Legifrance, n.d.*).

Ce rapide examen des conditions réglementaires relatives au risque de crue en agglomération parisienne nous permet de conforter notre observation du chapitre 5 : un potentiel travail centralisé sur les questions de dépendances entre et au sein des différents réseaux techniques n'est pas envisagé dans les différents textes réglementaires sur le sujet. Les actions en collaboration avec les opérateurs de réseaux – notamment privés - qui seront discutées par la suite sont donc basées sur le volontariat.

## 7.2. UN TERRITOIRE COMPLEXE : IDENTIFICATION DES ACTEURS ET RESEAUX

### 7.2.1. De nombreuses parties prenantes

Les parties prenantes relatives à la problématique des réseaux techniques urbains (inter)dépendants sont nombreuses et diverses. Les acteurs français orbitant autour de la problématique des réseaux techniques urbains ont été listés dans le chapitre 5, ainsi que leurs attributions et missions relatives à notre problématique. Le Tableau 22 analyse notamment les rôles des différents services de l'Etat, des collectivités, des opérateurs d'importance vitale et des autres opérateurs et souligne la complexité de cette répartition.

Par ailleurs, la problématique des réseaux face aux inondations en agglomération touche à la fois à la gestion de l'eau, à l'aménagement du territoire, à la planification et la prévention ainsi que la gestion de crise, mais aussi au monde de l'assurance par exemple. De plus, les spécificités de la région capitale et de l'aléa inondation augmentent la complexité institutionnelle pour la prise de décision. La multiplicité des acteurs qui interviennent aux différents échelons (national, bassin versant, région, départements, municipalités ou métropole) rend difficile la gouvernance entre ces différentes échelles territoriales. Les principaux acteurs de la gestion du risque inondation au sein de l'agglomération parisienne en relation avec la problématique des réseaux techniques urbains, sont listés dans le Tableau 40.



On souligne notamment les missions de police municipale ne sont pas attribuées au maire de Paris, mais au préfet de Police qui est également le préfet de la Zone de Défense de Paris. La préfecture de Police est chargée de la sécurité des biens et des personnes, et de la planification du dispositif spécifique inondation du plan ORSEC. Parallèlement, la préfecture de Paris et d’Ile-de-France assure le maintien des règles d’urbanisme et de protection des sites. Elle a donc en charge l’élaboration du Plan de Prévention du Risque d’Inondation (PPRI) et les différentes actions de prévention.

Tableau 40 : Les principaux acteurs de la gestion du risque inondation dans l’agglomération parisienne en relation avec les réseaux techniques urbains.

| ACTEURS   | RATTACHEMENTS  | PERIMETRE   |
|---|--|---|
| Préfecture de police  | Ministère de l’intérieur   | Paris et les départements de la petite couronne (Hauts-de-Seine, Seine-St-Denis, Val-de-Marne)  |
| Secrétariat général de la zone de défense et sécurité                               | Ministère de l’intérieur   | Zone de Défense (Ile-de-France)   |
| Centre interministériel de crise  | Ministère de l’intérieur   | France  |
| Direction régionale de l’environnement et de l’énergie en Ile-de-France (DRIEE IDF) | Le ministère de l’écologie, du développement durable et de l’énergie (MEDDE)   | Région Ile-de-France  |
| Préfecture de Paris et d’Ile-de-France  |  | Région Ile-de-France  |
| Conseils départementaux d’Ile-de-France   |  | Départements  |
| Conseils municipaux et syndicats intercommunaux                                     |  | Communes et intercommunalités   |
| Etablissement public territorial de bassin Seine Grands Lacs                        | Collectivités faisant partie du syndicat mixte   | Paris, les départements de la petite couronne, la communauté d’agglomération de Troyes Champagne et celle de Saint-Dizier Der et Blaise |
| Agence de l’eau Seine-Normandie   | MEDDE et Ministère des Finances  | Bassin hydrographique de la Seine et des fleuves côtiers normands   |
| Gestionnaires de réseaux  | Communes, entreprises, syndicats...  | Divers  |
| Sociétés d’assurance  |  | Divers  |
| Associations (MRN, AFPCN, CEPRI...)   | Divers   | Divers  |
| Chercheurs  | Ministère de l’Enseignement supérieur, de la recherche et de l’Innovation, Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, Ville de Paris... | Divers  |

La diversité des parties prenantes intervenant dans la gestion des réseaux techniques urbains est représentée par la Figure 96. Cette figure schématise les différentes catégories de parties prenantes (services de l’Etat, établissements publics, collectivités, associations et chercheurs, gestionnaires de

réseaux) selon leur nature et les relations qu'elles entretiennent entre elles (Bocquentin et al., 2018). Et c'est bien la complexité de cet écosystème qui ressort de cette représentation, pourtant simplifiée et non exhaustive. Rien qu'entre eux, les différents gestionnaires de réseaux (publics, privés, syndicats, services techniques) peuvent par exemple être en concurrence, en collaboration, en délégation, en dépendants, interdépendants, indépendants...

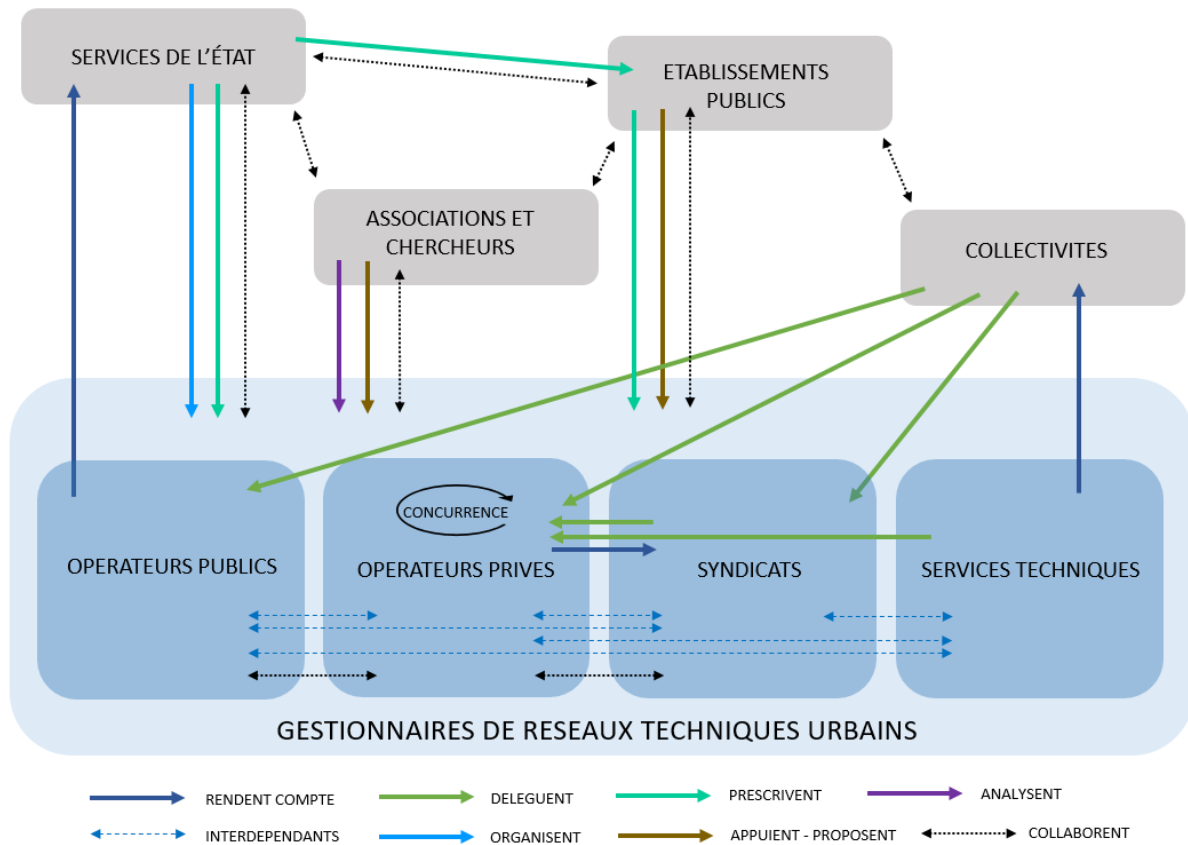


Figure 96 : Représentation schématique non exhaustive de la diversité des parties prenantes concernant la problématique des réseaux (inter)dépendants, et des relations qu'ils entretiennent.

Les acteurs en charge d'un même service urbain, par exemple l'alimentation en eau potable, peuvent alors être nombreux et divers au niveau de la nature (services responsables de l'eau au sein des collectivités, syndicats en charge de l'alimentation en eau potable du territoire, opérateurs en régie ou privé chargé de la gestion du réseau, etc.), de leur fonctionnement, de leur périmètre et de leurs missions. La Figure 97 présente sur une carte les périmètres de certains acteurs du service de l'alimentation en eau potable de l'agglomération parisienne, en mentionnent le responsable et le délégataire. L'eau potable est ainsi gérée à la fois par des communes telles que la Ville de Paris, des établissements publics de coopération intercommunale tels que le SEDIF (Syndicat des Eaux d'Ile-de-France) et le SEPG (Syndicat des Eaux de la Presqu'île de Gennevilliers), des grands groupes privés tels que Véolia ou Suez, des régies publiques telles que Eau de Paris, et des syndicats mixtes tels que Aquavesc.

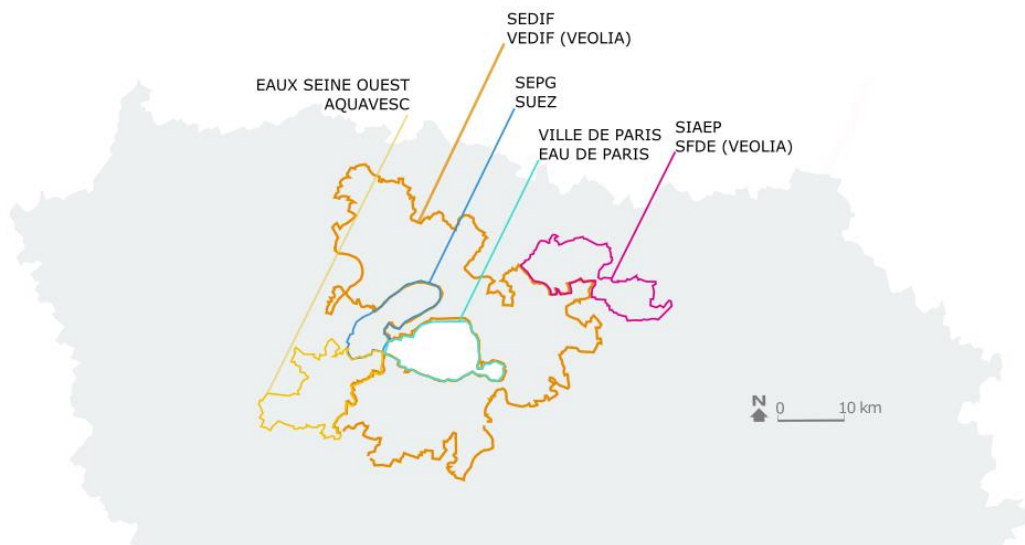


Figure 97 : Représentation cartographique non exhaustive des périmètres de différents acteurs du service de l'alimentation en eau potable en agglomération parisienne.

Malgré un ensemble d'outils réglementaires et financiers (plans de prévention des risques, régime d'indemnisation Cat Nat, programmes PAPI...) au niveau national, la gestion du risque de crue de la Seine en Île-de-France demeure fragmentée entre les couches successives de décentralisation. L'absence d'une réelle dynamique centralisée s'appuyant sur une vision d'ensemble de ce risque révélait il y a encore quelques années un déficit de gouvernance, notamment au vu des enjeux concernés (OCDE, 2014).

#### 7.2.1.1. Les représentants de l'Etat

Les initiatives institutionnelles s'accroissent ces dernières années au niveau français et particulièrement sur notre territoire d'étude. Les structures de gouvernance pour la prévention du risque d'inondation au sein de l'Île-de-France ont été rationalisées, même si le caractère complexe demeure et que le portage politique semble encore insuffisant. Le pilotage conjoint de la SLGRI par la Préfecture de Région (dont la DRIEE) et la Préfecture de Police a entraîné une clarification et une rationalisation des actions, de même que la création d'une structure de gouvernance dédiée (OCDE, 2018).

Divers travaux sont organisés dans le cadre de l'application de la SLGRI du TRI de la métropole francilienne. On peut citer les groupes de travail thématiques qui traitent de l'électricité, de l'eau et de l'assainissement, de la gestion des déchets, des transports et des réseaux de chaleur. Une charte intitulée « quartiers résilients » a été validée et signée le 5 mars 2018 avec les principaux acteurs de l'aménagement urbain ainsi que des collectivités de l'agglomération (DRIEE IDF, 2018). Basé sur le volontariat, elle incite les acteurs à concevoir des quartiers dans lesquels le risque inondation est anticipé dans l'objectif de réduire la vulnérabilité et faciliter le retour à la normale. Elle complète ainsi les prescriptions réglementaires des PPRI en zone inondable. La construction de quartiers adaptés, où le fonctionnement des réseaux nécessaires au maintien sur place de la population est garanti est aussi l'un des chantiers du Grand Paris.

Afin de contribuer à la réduction de la vulnérabilité des réseaux structurants, une déclaration d'intention a également été signée le 20 mars 2016 en Île-de-France (DRIEE IDF et al., 2016). Cette initiative a pour objectif de faciliter la coordination entre les opérateurs de réseaux urbains, les collectivités locales et l'Etat en cas de crise. Cette déclaration d'intention constitue le socle de

différentes actions et dynamiques et fournit un cadre formel de communication et de partage d'informations. Le travail basé sur les cartographies de vulnérabilité sera détaillé dans une partie dédiée du chapitre 9. Il est toutefois à regretter que la SLGRI ne fixe pas une vision de long terme à 20-30 ans et d'objectifs opérationnels et chiffrés. Enfin, comme le souligne l'enquête de l'OCDE en 2018, cette stratégie n'a pas conduit à définir de critères d'évaluation et de performance, permettant de mesurer les progrès réalisés notamment au niveau des réseaux techniques (OCDE, 2018).

Les impacts d'une inondation à cinétique lente ne représentent pas des menaces directes pour les populations, comme cela a été souligné lors de la présentation de l'aléa. C'est une des raisons pour lesquelles le risque d'inondation majeure en Ile-de-France a d'abord été considéré et étudié comme un choc économique de grande ampleur et de grande échelle, qui pourrait potentiellement paralyser le fonctionnement de la région voire de la nation du fait des pertes d'activités (Moatty & Reghezza-Zitt, 2018; OCDE, 2014; Reghezza, 2006). Ce n'est que depuis quelques années que les réflexions s'intéressent aux populations et aux impacts de la crue sur ceux-ci (Moatty & Reghezza-Zitt, 2018). Ces impacts passent notamment par les réseaux techniques urbains. En cas de crue majeure, l'évacuation des centaines de milliers de ménages sinistrés (Fujiki, 2017) n'est en effet pas la priorité de la Préfecture de Police et la question de la continuité d'activité et des défaillances des réseaux devient alors centrale pour le maintien sur place des populations sur des périodes allant de quelques jours à plusieurs semaines.

C'est dans ce contexte que les travaux du SGZDS prennent place, notamment la participation aux groupes de travail thématiques, l'animation du réseau d'acteurs et l'organisation d'exercices de gestion de crise comme EU Sequana (November & Créton-Cazanave, 2017) et Sequana 1518 .

#### 7.2.1.2. Les collectivités

La dynamique relative au risque de crue majeure en Ile-de-France est portée d'une part par l'Etat et ses représentants, et d'autre part par l'EPTB Seine-Grands-Lacs. Cet établissement public territorial de bassin créé en 1969 sous le nom d'Institution interdépartementale des barrages-réservoirs du bassin de la Seine (IIBRBS) est dorénavant dénommé Seine Grands Lacs. Son périmètre d'action dépasse largement le territoire de ses 4 collectivités membres initiales que sont Paris et les trois départements de la petite couronne. La loi MAPTAM a incité en 2017 Seine Grands Lacs à accélérer l'ouverture de sa gouvernance à de nouvelles collectivités territoriales du bassin amont de la Seine et à devenir un syndicat mixte. Des représentants de la communauté d'agglomération de Troyes Champagne Métropole et de la communauté d'agglomération de Saint-Dizier Der et Blaise siègent donc au conseil d'administration aujourd'hui. L'EPTB Seine Grands Lacs voit alors son rôle d'animation, de coordination et de mise en œuvre des actions de prévention dans les territoires, renforcé.

Les efforts conduits depuis trois ans dans le cadre de la mise en œuvre du PAPI par l'EPTB et de l'application de la SLGRI ont permis l'amélioration de l'engagement des parties prenantes, comme cela est souligné par l'enquête réalisée par l'OCDE en 2018 (OCDE, 2018). Les ateliers PAPI sont un exemple d'actions auprès des collectivités. Ces exercices de simulation de crue rassemblant des représentants de communes, d'intercommunalités, d'opérateurs de réseaux, de préfetures, de services de l'Etat et de services de secours. Un des objectifs était notamment d'aider à développer l'opérationnalité des PCS.

La nouvelle Métropole du Grand Paris s'est, quant à elle, vue confier la compétence de prévention des inondations GEMAPI. La future articulation des responsabilités entre les différentes structures de gouvernance et le portage politique de la SLGRI pourrait en être affectée. Les réflexions à ce sujet ne sont cependant pas matures à ce stade, bien qu'elles devraient être arrêtées fin 2019. Les collectivités

commencent également à s'intéresser à la problématique des réseaux techniques urbains et à leurs vulnérabilités. On observe qu'en Ile-de-France, les communes ne sont pas encore toutes munies d'un PCS (Richardot, 2016).

Les dépendances et les défaillances en cascade ne sont généralement pas identifiées en tant que telles. Et les zones considérées comme « touchées » par la crue sont les zones submergées, sans tenir compte des zones touchées par des dysfonctionnements indirects des réseaux par exemple. Les impacts des dysfonctionnements au sein des différents réseaux sont cependant parfois cartographiés voire discutés avec les gestionnaires de réseaux, qu'ils soient des syndicats, des services communaux, des régies ou des entreprises privées. Des SIG utiles à la gestion des risques et à la surveillance des réseaux techniques sont construits et utilisés par certaines collectivités, notamment les préfectures de départements.

Une amélioration de la prise en compte des réseaux urbains dans la gestion de crise est souhaitée par celles-ci, le manque de connaissances sur ces infrastructures étant soulevé par de nombreuses collectivités, de même que de nombreuses incertitudes concernant les comportements de certains réseaux (Varesano, 2018). Les exercices et ateliers tels que l'exercice EU Sequana ont cependant permis aux collectivités participantes de recueillir des données, même si elles ne sont pas toutes exploitables. Les collectivités sont parfois confrontées à des difficultés organisationnelles au niveau de la gouvernance et de la coordination de certains sujets, notamment au cours d'une crise, que ce soit avec les autres collectivités, les échelons territoriaux supérieurs ou les opérateurs de réseaux.

#### 7.2.1.3. Les opérateurs

Les démarches engagées par les opérateurs de réseaux se multiplient. Ces derniers travaillent ainsi au renforcement de la résilience de leurs infrastructures depuis quelques années, de façon autonome, collective ou en lien avec les collectivités ou le Secrétariat Général de la Zone de Défense et de Sécurité, et ce notamment dans le cadre de la réglementation du PPR de la Ville de Paris. La Zone de Défense s'inscrit ici dans un rôle de soutien aux opérateurs et d'appui central. Ces opérateurs sont par ailleurs actifs dans le cadre des activités organisés par les collectivités et services de l'Etat cités plus haut (exercices, ateliers, groupes de travail, déclaration d'intention...).

ERDF (distribution d'électricité), RTE (transport d'électricité), GRDF (distribution de gaz), GRT Gaz (transport de gaz), RATP (transports en commun), SNCF (transports ferré et en commun), SGP (Société du Grand Paris pour la conception du Grand Paris Express), Eau de Paris (distribution d'eau potable et non potable), SIAAP (assainissement), Véolia Eau (assainissement), Suez Environnement Eau France (distribution d'eau potable), Orange (télécommunications), Numéricâble-SFR (télécommunications), Bouygues Télécom (télécommunications) ont signé la déclaration d'intention de 2016 pour la réduction de la vulnérabilité des réseaux structurants. Par la signature de cette déclaration d'intention, les concepteurs et opérateurs de réseau s'engagent à améliorer le diagnostic de leurs vulnérabilités, se préparer à la gestion de crise, travailler à la réduction de la vulnérabilité et l'amélioration de la résilience de leur réseau.

Un Plan de Continuité d'Activité est mis en place ou en cours de rédaction chez la quasi-totalité des opérateurs de réseaux. Concernant le Plan de Protection Contre les Inondations, la situation est plus mitigée avec certains plans non approuvés voire non rédigés. Les actions, outils, et dynamiques des opérateurs de réseaux seront détaillés dans le chapitre 8 lors de la présentation des résultats d'une enquête auprès de ceux-ci.

### 7.2.2. Des réseaux techniques urbains nombreux et divers

Les réseaux techniques urbains présents sur la zone d'étude sont un exemple parlant de la complexité de ce type de systèmes. Nous rappelons que nous considérons les réseaux techniques urbains suivants : eau potable, assainissement, déchets, gaz, électricité, hydrocarbures, fluides calorifiques, télécommunications, voirie, transports ferrés. Ils sont en effet nombreux, gérés par des opérateurs très divers (dans leur organisation ou leur fonctionnement) qui peuvent se partager la gestion d'un même réseau sur différentes zones ou sur différentes missions.

Leurs infrastructures sont denses, pour la majorité souterraines (cf. Figure 98), et partagent souvent des galeries et des interconnexions (exemple du passage de gaines de télécommunications dans les tunnels de transports en commun).

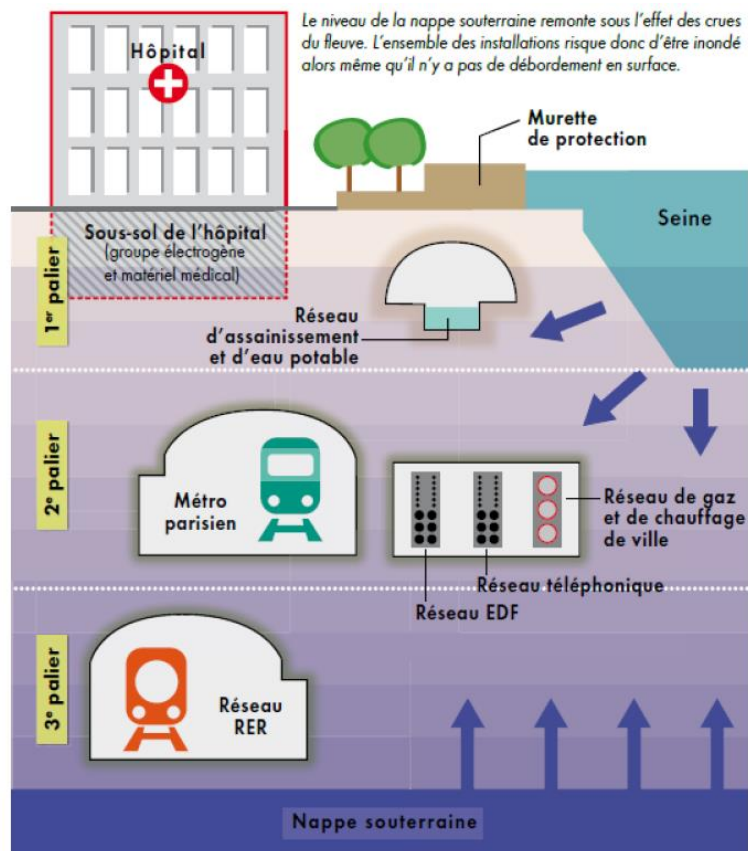


Figure 98 : Coupe simplifiée du sous-sol parisien situé dans la plaine alluviale. Source : (Veyret & Laganier, 2013).

Ces réseaux dépassent généralement les échelles communales, voire départementales, et les gestionnaires des réseaux techniques urbains diffèrent notamment au niveau de leur périmètre d'action géographique. Cette diversité de périmètres est illustrée dans la Figure 99 portant sur les gestionnaires de plusieurs réseaux techniques structurants au sein de l'agglomération parisienne, qui ont été rencontrés lors de l'enquête présentée dans le chapitre suivant. Ces périmètres d'action ne correspondent d'ailleurs pas non plus au périmètre de la gestion de l'aléa inondation.

Ces opérateurs et leurs réseaux diffèrent également par leur organisation, leurs vulnérabilités, et leurs (inter)dépendances. Cette diversité sera détaillée dans le chapitre 8 avec une caractérisation et une description de chaque réseau analysé dans notre zone d'étude.

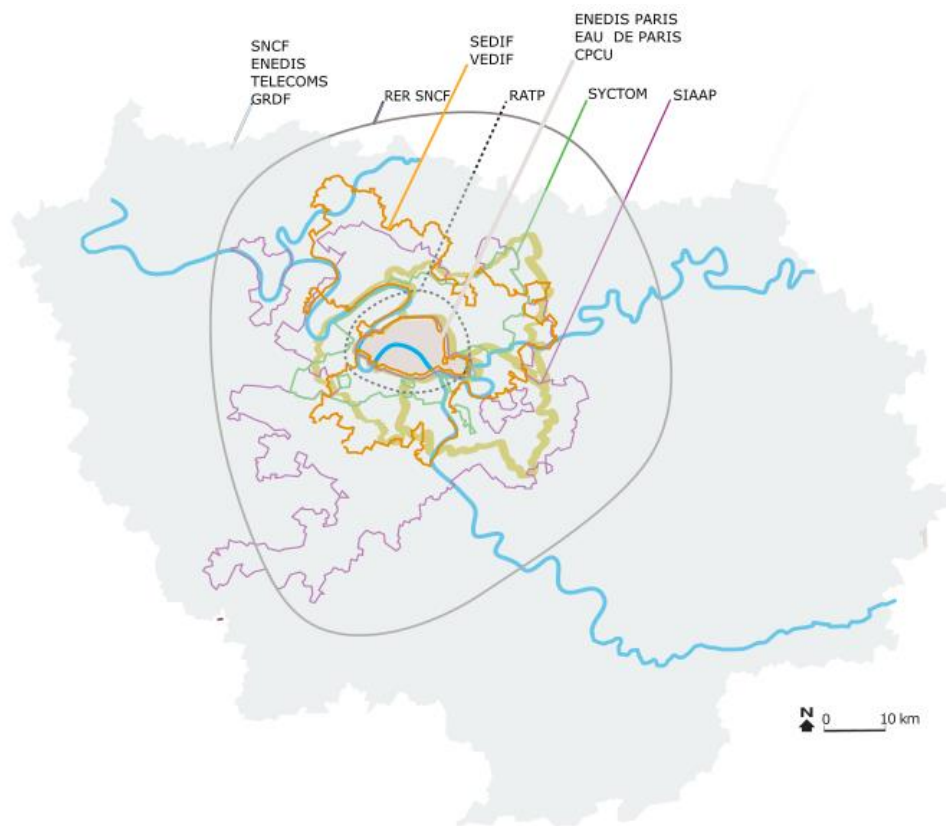


Figure 99 : Les périmètres d’action des opérateurs rencontrés. Source : adapté et complété de (Richardot, 2016) d’après (Toubin, 2014).

### 7.1.5. Un territoire vulnérable au risque de crue par le biais de ses réseaux

Ces réseaux et leurs infrastructures sont essentiels au bon fonctionnement de ce territoire urbain, dense, au cœur des enjeux économiques, politiques et stratégiques. L’agglomération parisienne est d’ailleurs exposée à de nombreux aléas pouvant impacter ces réseaux : tempêtes, épisodes neigeux, attaques terroristes, canicules, risques sociaux ou encore inondations. L’inondation est un aléa particulièrement probable et redouté, dont les différentes occurrences ont marqué l’histoire de l’agglomération.

On estime qu’une crue de type centennale de la Seine en Ile-de-France pourrait occasionner des dommages directs allant jusqu’à 30 milliards d’euros (des pertes humaines sont très peu probables au vu de la lenteur de montée des eaux attendue) et, notamment compte tenu de l’arrêt des services et réseaux urbains, d’un impact sur le PIB allant jusqu’à 58,5 milliards d’euros (OCDE, 2014, 2018). Dans cette région, 830 000 personnes vivent en effet en zone inondable. Des estimations ont été réalisées pour quantifier le nombre de personnes situées en zone inondable par département et par scénario, et sont présentées dans la Figure 100.

Une crue majeure aurait de plus des impacts sur un territoire plus étendu que la seule zone inondable, que ce soit par le biais de l’inondation des sous-sols et caves et des remontées de nappes ou par le biais des impacts sur les réseaux techniques et des potentiels effets cascade. L’OCDE estimait il y a quelques années que plus de 5 millions de franciliens pourraient être impactés significativement dans leur vie quotidienne (OCDE, 2014).

| Département                 | Scénarios d'inondation |       |        |        |        |        |        |        |
|-----------------------------|------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                             | R06                    | R07   | R08    | R085   | R09    | R1     | R105   | R115   |
| <b>Paris</b>                | 0                      | 0     | 0      | 882    | 18553  | 61595  | 85179  | 127631 |
| <b>Seine-et-Marne</b>       | 3093                   | 9375  | 17558  | 30185  | 46312  | 63401  | 70464  | 76268  |
| <b>Yvelines</b>             | 2107                   | 9374  | 21702  | 28857  | 36944  | 55295  | 63457  | 74891  |
| <b>Essonne</b>              | 506                    | 4034  | 14138  | 28052  | 45355  | 56648  | 63183  | 70284  |
| <b>Hauts-de-Seine</b>       | 245                    | 3851  | 8313   | 13817  | 36472  | 152046 | 204991 | 293743 |
| <b>Seine-Saint-Denis</b>    | 144                    | 2750  | 5373   | 6308   | 16375  | 26825  | 30474  | 34507  |
| <b>Val-de-Marne</b>         | 5695                   | 14719 | 42912  | 54778  | 123125 | 208733 | 243957 | 270587 |
| <b>Val d'Oise</b>           | 486                    | 1398  | 3196   | 3930   | 6305   | 10620  | 15035  | 22831  |
| <b>Région Ile-de-France</b> | 12276                  | 45501 | 113192 | 166808 | 329441 | 635164 | 776739 | 970740 |

Figure 100 : Estimation du nombre de personnes en zone inondable selon les scénarios de crue en Ile-de-France. Source : (Fujiki, 2017).

Certains territoires devraient notamment connaître des coupures d'électricité, pouvant durer de plusieurs jours à plusieurs semaines. Celles-ci auraient alors des répercussions importantes sur le fonctionnement du territoire : télécommunications, services de secours, assainissement, chauffage, distribution d'eau potable, réseaux de transport. Les impacts potentiels sur les réseaux de transport ferré et routier sont présentés sous forme cartographique dans la Figure 101.

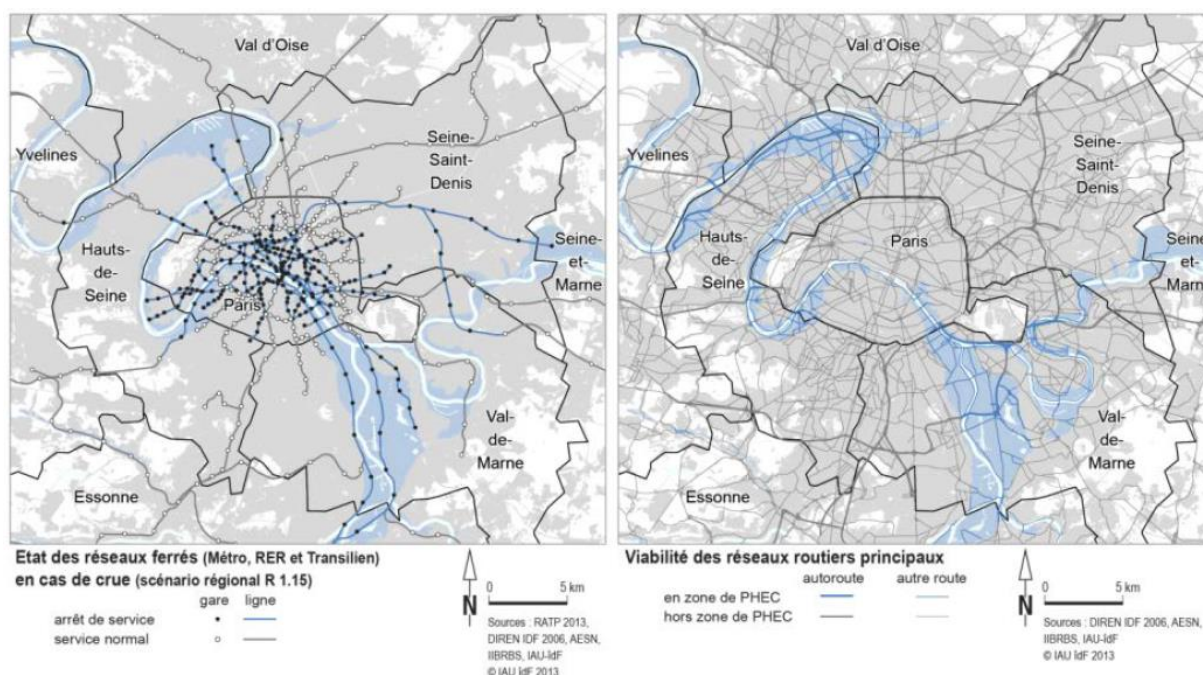


Figure 101 : Impacts potentiels d'une crue majeure centennale sur les réseaux ferrés et routiers en Ile-de-France. Source : Cartographie réalisée par l'IAU IdF pour (OCDE, 2014).

On y observe les arrêts de transports en commun ferrés fermés à droite pour un scénario de crue R1.15, et les tronçons routiers en zones inondables correspondant aux PHEC (plus hautes eaux connues) à gauche. Les transports ferrés sont ainsi très impactés par ce type de scénario, et ce même dans les zones non inondées, notamment au centre de Paris.



Depuis la crue de janvier 1910, l'exposition des biens et des personnes s'est considérablement accrue à cause de l'urbanisation croissante du territoire inondable et de la multiplication et densification des réseaux techniques urbains en son sein, et de leur place essentielle dans le fonctionnement urbain actuel. Un retour d'expérience synthétique de la crue centennale de janvier 1910 est présenté dans l'annexe 2, en suivant la méthodologie proposée dans le chapitre 9.

Il reprend tout d'abord l'événement de crue en lui-même, et son déroulé et détaille ensuite les défaillances constatées au niveau des différents réseaux techniques existants et si possible les impacts de ces défaillances par le biais des dépendances observées. Ce retour d'expérience permet de souligner l'existence de phénomènes de défaillances en cascade à cette époque, alors que les réseaux techniques de l'époque étaient bien moins complexes, denses, et interconnectés.

De nombreuses actions sur l'aléa ont été réalisées depuis, notamment des travaux d'aménagement puis la construction des 4 grands lacs-réservoirs gérés par l'EPTB Seine Grands Lacs qui permettent de dériver et de stocker provisoirement 800 millions de m<sup>3</sup> d'eau en amont de l'agglomération pour limiter la montée des eaux. Les protections parisiennes le long du fleuve sont théoriquement capables de protéger la capitale, mais le reste de l'agglomération est beaucoup plus vulnérable, en particulier le Val-de-Marne et les Hauts-de-Seine (OCDE, 2014). La politique actuelle de prévention des inondations en Ile-de-France vise ainsi à réduire la vulnérabilité de l'agglomération liée aux dysfonctionnements des réseaux techniques structurants, qui ralentissent le retour à la normale et multiplient les impacts de l'inondation au-delà de la zone inondée (DRIEE, 2015).

Les crues récentes de juin 2016 et janvier 2018, ont également ravivé la mémoire de ce type d'aléa et des potentiels impacts sur le fonctionnement de l'agglomération francilienne. Ces événements et les perturbations en découlant ont concerné à la fois des zones inondées et non inondées, et ont impacté plusieurs réseaux techniques : tronçons et stations de transports en commun fermés, coupures d'électricité, de chauffage ou d'eau dans des centres villes de la petite et grande couronne parisienne... Un retour d'expérience de ces deux événements est proposé dans le chapitre 9.

### 7.3. CONCLUSION

L'agglomération parisienne se trouve donc au cœur de nombreux enjeux géopolitiques, socio-économiques et stratégiques et présente une complexité très forte, que ce soit au niveau des questions de gouvernance, de relations entre parties prenantes, de gestion des réseaux techniques denses et complexes, mais aussi de concentration des enjeux et des populations. Vulnérable au risque de crue majeure, elle a été impactée par divers épisodes passés tels que la crue centennale de 1910 durant laquelle quelques cascades ont pu être observées. Le nombre, la diversité et les relations des différents acteurs impliqués dans la problématique des réseaux techniques font également de l'agglomération parisienne une zone d'étude particulièrement complexe à analyser dans notre contexte de recherche.

On note ces dernières années une prise de conscience forte de l'importance de la continuité d'activité des réseaux techniques critiques pour la résilience de l'agglomération, ainsi que des impacts en cascade liés à leur interruption. L'OCDE a constaté en 2018 qu'une dynamique d'amélioration avait été engagée depuis son diagnostic de 2014, accélérée suite aux inondations de mai-juin 2016. Cette dynamique reste cependant insuffisante par rapport aux enjeux (OCDE, 2018). Une étude approfondie de l'état des connaissances et des démarches engagées concernant la prise en compte des réseaux techniques dans la gestion de crise en cas d'inondation majeure de la Seine (Richardot, 2016) a

également montré une évolution récente du contexte de travail des professionnels de la gestion de crise et des données mises à disposition sur la vulnérabilité aux inondations des réseaux techniques, suite à diverses initiatives et actions qui seront présentées au chapitre 8.

La problématique de l'étude et de la modélisation des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade au sein des réseaux techniques urbains de l'agglomération parisienne fait donc sens, et présente un intérêt majeur. Après notre analyse de l'aléa, de la zone d'étude, des parties prenantes, il nous faut à présent s'intéresser aux réseaux techniques urbains qui seront au centre du chapitre 8.

# CHAPITRE 8 : POSSIBILITES POUR L'ETUDE DES PHENOMENES D'(INTER)DEPENDANCES ET DEFAILLANCES EN CASCADE

Le chapitre 8 a pour objectif la réalisation d'un état des lieux plus détaillé de la gestion des réseaux techniques urbains au sein de l'agglomération parisienne face à une crue majeure. Notre démarche s'appuie principalement sur des travaux bibliographiques, des observations et sur une enquête menée auprès des gestionnaires de réseaux.

La méthodologie déployée est présentée, ainsi que les modalités de l'enquête. Une synthèse des résultats obtenus, et de leur analyse, est proposée sous la forme d'un diagnostic de la situation en suivant la grille d'analyse proposée dans le chapitre 5. Ce chapitre permet ainsi de consolider et de détailler l'analyse de la situation de l'agglomération parisienne débutée dans le chapitre 7.

Une première partie permet l'analyse des vulnérabilités, dépendances et impacts potentiels pour les différents réseaux techniques urbains étudiés sur le territoire. Une deuxième partie s'intéresse à la gestion de ces réseaux, à la considération des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade, aux outils utilisés, aux initiatives passées et actuelles, ainsi qu'aux ressources et données disponibles. Ce chapitre introduit finalement les solutions envisageables sous un angle purement technique et théorique, sans tenir compte des objectifs et ressources d'un potentiel décideur.

## 8.1. PRESENTATION DE LA METHODOLOGIE APPLIQUEE

L'analyse du contexte opérationnel de l'agglomération parisienne face au risque de crue majeure a été réalisée à travers trois canaux d'informations : des analyses bibliographiques, la participation aux actions collectives et la réalisation d'une enquête auprès des gestionnaires de réseaux techniques. Ces canaux d'informations et leurs modalités sont présentés plus en détails ci-dessous.

### 8.1.1. Collecte d'informations

#### 8.1.1.1. Analyse bibliographique

Les analyses bibliographiques classiques ont été une source importante d'informations. Les textes réglementaires (Bureau de l'Urbanisme - Ville de Paris, 2007; DRIEE IDF, 2013; Préfecture de la Seine-St-Denis, 2007; Préfecture de l'Essonne, 2003; Préfecture des Hauts-de-Seine, 2004), les rapports institutionnels stratégiques ou opérationnels (Association Espaces, 2013; CEPRI, 2016; CGEDD, 2013) ont été mis à contribution. Des rapports de synthèse et de retours d'expérience (CCR, 2018; CGEDD, 2017, 2018), des travaux de recherche (Pottier & Richardot, 2017; Toubin, 2014; Varesano, 2018), des plans de protection et de continuité d'activité (ERDF - IDF Est, 2015; RATP - Cellule Inondation, 2012; Section de l'Assainissement Parisien, 2019) et les productions de différents opérateurs (Azzouz et al., 2017; VEOLIA Eau Ile-de-France & SEDIF, 2017) ont également été utilisés.

Ces documents consultés pouvaient être destinés au grand public ou à communication restreinte selon les cas. Certains ont pu être récupérés par le biais de rencontres et de participation à des événements particuliers. Les documents dont la diffusion est publique sont cités et référencés dans la bibliographie.

### 8.1.1.2. Enquête auprès des gestionnaires de réseaux

Afin de compléter et de consolider les éléments collectés au cours des analyses bibliographiques et des rencontres avec les parties prenantes, une enquête auprès des gestionnaires des réseaux techniques de l'agglomération parisienne a été réalisée. Cette enquête avait pour objectif de collecter et d'analyser des informations complémentaires et supplémentaires concernant les connaissances, les pratiques, les besoins et les contraintes des opérateurs de réseaux urbains dans leur gestion des crues pour l'agglomération parisienne, et ce notamment au regard des crues récentes de 2016 et 2018.

L'enquête a été menée à travers des entretiens et le renseignement de deux questionnaires en ligne successifs, pendant l'été et l'automne 2018. La prise de contact avec les opérateurs – ciblés parmi les signataires de la Déclaration d'Intention de 2016 participant à la plateforme collaborative - s'est faite soit à l'occasion des différents événements listés plus haut, soit par l'intermédiaire de la cellule « Inondation » de la Zone de Défense et de Sécurité de Paris.

L'obtention de réponses favorables à la tenue de l'enquête a nécessité plusieurs relances et quelques négociations. Les entretiens ont été réalisés en face à face pour la majorité et par le biais d'un questionnaire en ligne pour quelques répondants, afin de recueillir les réponses et les réflexions d'un ou deux experts de chaque opérateur. Les questions posées étaient identiques quelles que soient les modalités.

La réalisation de l'enquête a été appuyée durant l'été 2018 par Mathilde Scherrer, dans le cadre d'un stage de 3 mois, pour construire le premier questionnaire, le tester et enregistrer les premières réponses obtenues. Un deuxième questionnaire annexe, centré sur les cartographies de vulnérabilité, a été construit à la suite du traitement des résultats du premier. Ce court questionnaire a été partagé en ligne pour des questions de délais et de praticité. Le traitement des résultats a été réalisé durant l'hiver 2018 et un document de synthèse correspondant aux exigences des répondants a été rédigé, puis corrigé et amendé jusqu'à la fin du mois de mars 2019 (Bocquentin, 2019).

Les sujets suivants ont été abordés :

1. Infrastructures critiques
2. Vulnérabilités et (inter)dépendances
3. Outils utilisés
4. Planification
5. Echanges d'informations
6. Identification des manques et besoins
7. Cartographies de vulnérabilités

Les résultats issus de l'enquête et présentés dans la suite de ce manuscrit sont anonymisés (c'est-à-dire que les répondants ne sont pas identifiés selon leur réponse) par souci de confidentialité, car le sujet des vulnérabilités et des défaillances peut s'avérer délicat pour ce type d'acteurs. La synthèse identifiant les répondants a été partagée au sein du groupe restreint des opérateurs ayant participé à l'enquête et au service « Inondation » de la Zone de Défense et de Sécurité.

Les deux questionnaires sont repris en annexes 3 et 4. Les répondants à l'enquête sont présentés dans le Tableau 41 par le biais de l'intitulé de leur poste et de leur ancienneté à celui-ci, sans que leur nom ne soit mentionné. Ce sont les personnes chargées de la gestion du risque inondation (ou du risque et de la sécurité en général) dans les différentes organisations. La problématique de la crue et de ses impacts sur les réseaux techniques peut alors représenter la totalité de leur activité ou une assez faible proportion.

Tableau 41 : Présentation des répondants de l'enquête réalisée auprès des opérateurs.

| ORGANISATION   | INTITULE DU POSTE OCCUPE  | ANCIENNETE        |
|----------------|---|-------------------|
| SIAAP          | Responsable du service Etudes Générales à la Direction Technique                    | NC                |
| SFR            | Chef de projet Gestion du risque crue   | Moins de 2 ans    |
| GRDF           | Inspecteur régional de sécurité régionale   | Entre 2 et 5 ans  |
| Enedis         | Chef de mission - Etude d'impact crue sur le réseau électrique parisien             | Entre 2 et 5 ans  |
| Enedis Paris   | Chargé du contrat de concession Enedis pour la Ville de Paris                       | Entre 2 et 5 ans  |
| SEDIF          | Chargé d'études – Service Gestion du patrimoine et schémas directeurs               | Entre 2 et 5 ans  |
| CPCU           | Chef de projets hydrauliques  | Entre 2 et 5 ans  |
| RATP           | Chargé d'Affaires PPRI  | Plus de 10 ans    |
| Eau de Paris   | Responsable de la sûreté et de la gestion des risques, Direction de la distribution | Entre 2 et 5 ans  |
| SNCF           | Responsable de la mission inondation - Direction de la sûreté                       | Entre 2 et 5 ans  |
| VEOLIA - VEDIF | Responsable de la Coordination Maitrise des Risques                                 | NC                |
| SIAAP          | Ingénieur hydraulicien au service Etudes Générales à la Direction Technique         | Entre 5 et 10 ans |
| Enedis IFO     | Adjoint au directeur IFO  | Plus de 10 ans    |
| RATP           | Chargé d'Affaires PPRI  | Moins de 2 ans    |

### 8.1.1.3. Observations et entretiens informels

La nécessité et l'intérêt de mieux appréhender et comprendre le contexte d'étude et les jeux d'acteurs ont rapidement été soulevés, comme démontré dans les chapitres précédents. Les motivations, les positionnements et les dynamiques d'influence sont notamment des éléments qui ne transparaissent pas forcément dans les documents consultés.

La participation à des colloques, des conférences, mais aussi des exercices de gestion de crise en tant qu'observatrice et à des ateliers a alors permis de recueillir de nombreuses informations complémentaires en parallèle de l'enquête auprès des gestionnaires, afin d'améliorer la compréhension de la situation. Elle a également permis d'amorcer une intégration dans le groupe restreint des parties prenantes actives sur le sujet et de réaliser des entretiens informels avec celles-ci. Une liste de ces événements est ici présentée :

- Observation de l'exercice de gestion de crise EU Sequana qui pris place en mars 2016, simulant une crue majeure en Ile-de-France et les événements associés (préparation, réunions, retours d'expérience...).
- Participation aux réunions portant sur les retours d'expérience des événements relatifs à la crue 2016 durant les mois de mai et juin 2016.

- Participation aux réunions portant sur les retours d'expérience des événements relatifs à la crue 2018 durant les mois de janvier et février 2018.
- Participation en tant qu'observatrice aux événements relatifs au programme de recherche Euridice (réunions, ateliers, restitutions). Ce programme rassemblait entre 2015 et 2018 plusieurs laboratoires et le SGZDS et s'intéressait à la gestion des risques, des crises et des événements majeurs.
- Observation de l'exercice de gestion de crise Sequana 1518 concentré sur une crue au niveau du XVème arrondissement de Paris et organisé en décembre 2018, ainsi que les événements associés (préparation, réunions, retours d'expérience...).
- Participation à certaines réunions relatives à l'application de la SLGRI.

### 8.1.2. Application de la grille d'analyse

Le diagnostic de la situation pour notre zone d'étude est réalisé par l'application de la grille d'analyse proposée dans le chapitre 6 (Bocquentin et al., 2018). Nous nous intéressons notamment aux données et connaissances disponibles, aux outils utilisés, aux initiatives actuelles et passées, et au niveau potentiel d'implication des gestionnaires de réseaux. On précise ici que les décideurs –porteurs éventuels d'une démarche- et leurs potentiels moyens ne sont pas identifiés et considérés ici.

Tableau 42 : Grille d'analyse du contexte auprès des parties prenantes.

| SUJETS A ABORDER  |
|---|
| Objectifs théoriques des décideurs, selon leur nature                               |
| Utilisation et niveau de détails désiré des résultats                               |
| Zone d'étude sélectionnée   |
| Réseaux urbains implantés et outils métiers utilisés                                |
| Objectifs politiques, économiques et techniques des décideurs                       |
| Volonté et motivation des décideurs   |
| Niveau de connaissance mobilisable par les décideurs                                |
| Niveau de détails et quantité des données disponibles                               |
| Niveau d'implication potentiel des gestionnaires                                    |
| Ressources humaines et budgétaires disponibles pour la mise en place de la démarche |

## 8.2. DES RESEAUX TECHNIQUES URBAINS DIVERS, CRITIQUES, VULNERABLES ET (INTER)DEPENDANTS

On présente ci-dessous la diversité et les spécificités des réseaux techniques urbains étudiés. Ceux-ci diffèrent en effet au niveau de leur fonctionnement, de leurs linéaires, de leur mode de gouvernance et de gestion, de leurs périmètres, de leurs vulnérabilités et de leurs dépendances.

### 8.2.1. Le réseau d'eau potable

Le réseau d'eau potable permet le captage, le traitement, le stockage et la distribution d'eau potable aux abonnés. Il est géré en Ile-de-France par deux acteurs principaux : Eau de Paris – entreprise de régie autonome - pour la capitale et le Syndicat des Eaux d'Ile-De-France (SEDIF) – établissement public de coopération intercommunale - pour les 7 autres départements. Véolia Eau Ile-de-France (VEDIF) est le délégataire de service du SEDIF. Le réseau francilien d'eau potable est dense, vieillissant, et le nombre d'habitants par abonné est très supérieur au reste du territoire du fait de nombreux compteurs collectifs.

Les canalisations d'eau potable étant sous pression, il n'est pas envisagé d'interrompre la distribution d'eau pour les zones inondées. En cas de rupture de canalisation, le réseau en amont du point de rupture doit être isolé en raison des désinfections nécessaires. C'est en fait le dysfonctionnement des usines de production de l'eau potable qui pourrait avoir des conséquences sur la distribution d'eau potable aux abonnés. Les usines diffèrent au niveau de leurs seuils de protection contre les inondations, de l'étanchéité de leur matériel et des solutions palliatives prévues. Ces usines sont vulnérables à une coupure d'alimentation électrique, notamment pour l'alimentation des machines de traitement, les moyens de gestion automatisés (dont les centrales de dispatching) et l'alimentation des pompes.

Le bon fonctionnement du réseau est également dépendant des télécommunications pour la télégestion et les échanges d'informations, ainsi que les systèmes de transports routiers ou ferroviaires pour les accès aux différents sites. L'alimentation électrique des usines devrait être assurée pour une crue majeure, en ayant parfois recours à des moyens palliatifs, et les liaisons pour le retour d'informations des stations devraient fonctionner, parfois en mode dégradé.

Une conduite à l'aveugle si le service informatique tombe en panne ou si les informations ne remonteraient plus est par ailleurs envisagée. Un approvisionnement grâce aux prélèvements dans des nappes de secours est également prévu, à condition que les infrastructures routières et ferroviaires soient accessibles.

Les dysfonctionnements potentiels des différents réseaux techniques, dont la distribution d'eau potable, ont été analysés par le Centre Européen de Prévention des Risques d'Inondation (CEPRI, 2016). On y retrouve les impacts sur les conditions de vie et de travail (notamment pour les sites des autres opérateurs de réseaux, ou pour le nettoyage des voiries), sur la gestion du risque incendie (spécificité de Paris et son réseau d'eau non potable) mais aussi la question des perturbations des systèmes de refroidissement d'autres réseaux, comme les télécommunications par exemple.

Les principaux liens de dépendances entrantes et sortantes au niveau du réseau de distribution d'eau potable sont schématisés dans la Figure 102. Cette figure et les suivantes résultent de la synthèse des éléments récoltés lors des entretiens et de l'analyse des références bibliographiques.

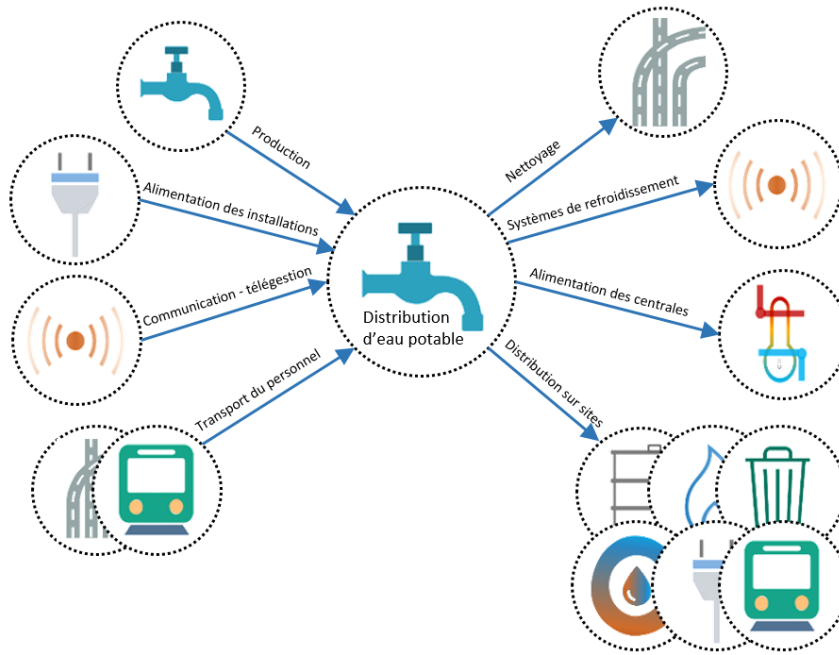


Figure 102 : Les principaux liens de dépendances entrantes et sortantes du réseau de distribution d'eau potable.

### 8.2.1. Le réseau d'assainissement

Le réseau d'assainissement permet la collecte, le transport et le traitement des eaux pluviales et des eaux usées, puis leur rejet dans les exutoires naturels. Sur la zone d'étude, le réseau d'assainissement est principalement exploité par deux gestionnaires. La Section d'Assainissement de la ville de Paris (SAP), qui relève de la Direction de la propreté et de l'eau, assure la collecte et le transport sur le territoire parisien. Le Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne (SIAAP) est un établissement public à caractère administratif qui gère l'assainissement des 4 départements que sont Paris, les Hauts-de-Seine, la Seine-St-Denis et le Val-de-Marne.

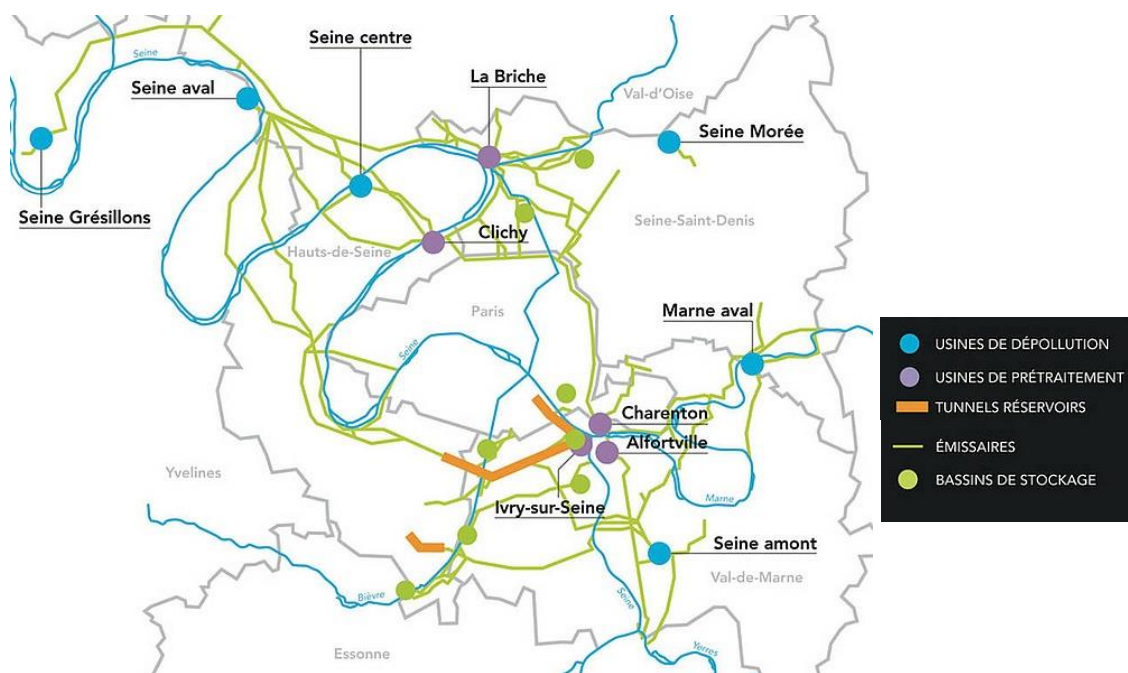


Figure 103 : Carte du réseau d'assainissement du SIAAP. Source : [www.siaap.fr](http://www.siaap.fr)



Le réseau d'assainissement est principalement vulnérable aux intrusions d'eau, aux ruptures et encombrements des canalisations mais aussi aux dysfonctionnements d'autres réseaux dont il est dépendant. On peut ainsi citer les dépendances à l'alimentation électrique, aux télécommunications, mais également les connexions physiques avec les réseaux de transports de surface ou enterrés par lesquels l'eau peut s'infiltrer ou être rejetée. La question de l'accessibilité aux différents sites est également à soulever. L'alimentation électrique des usines devrait être assurée jusqu'à un niveau équivalent au scénario R.1.0.

Une inondation des chaussées et tunnels est possible, ainsi que des refoulements vers des habitations en point bas du réseau, les clapets anti-retours n'étant pas encore installés partout. La question des remontées de nappes est également problématique et peu connue. Concernant le réseau de canalisations, des effondrements dus aux fortes pressions hydrostatiques sont également envisageables. Le dysfonctionnement ou l'inondation (par infiltrations, submersion, ou débit d'apport trop important) des usines de traitement des eaux usées peut finalement entraîner l'arrêt des traitements et donc le rejet des eaux polluées dans les cours d'eau. Le débit d'apport doit en effet être régulé afin d'éviter d'inonder les usines et pour continuer à collecter les eaux sur des zones non submergées.

Des protections mobiles et des solutions palliatives pour l'alimentation électrique sont notamment prévues, ainsi que des protocoles de cloisonnements du réseau. Une inconnue majeure concerne le débit potentiellement atteint selon les scénarios de crue, car les divers rejets non déclarés provenant de pompage, les remontées de nappes et la possible concomitance pluie-crue rendent les estimations très incertaines. Le centre de commande pour la gestion des outils de pilotage serait par ailleurs déplacé en zone non inondable. Les dysfonctionnements du réseau d'assainissement peuvent entraîner des impacts rapides et critiques sur les conditions de vie et de travail (notamment au niveau des sites des autres opérateurs de réseaux), sur les refoulements des eaux dans les habitations ainsi que sur la pollution du milieu par le rejet des eaux polluées non traitées. Les refoulements et débordements du réseau peuvent alors potentiellement impacter l'accessibilité sur certains tronçons de voirie ou certains tunnels. Les principaux liens de dépendances entrantes et sortantes au niveau du réseau d'assainissement sont schématisés dans la Figure 104.

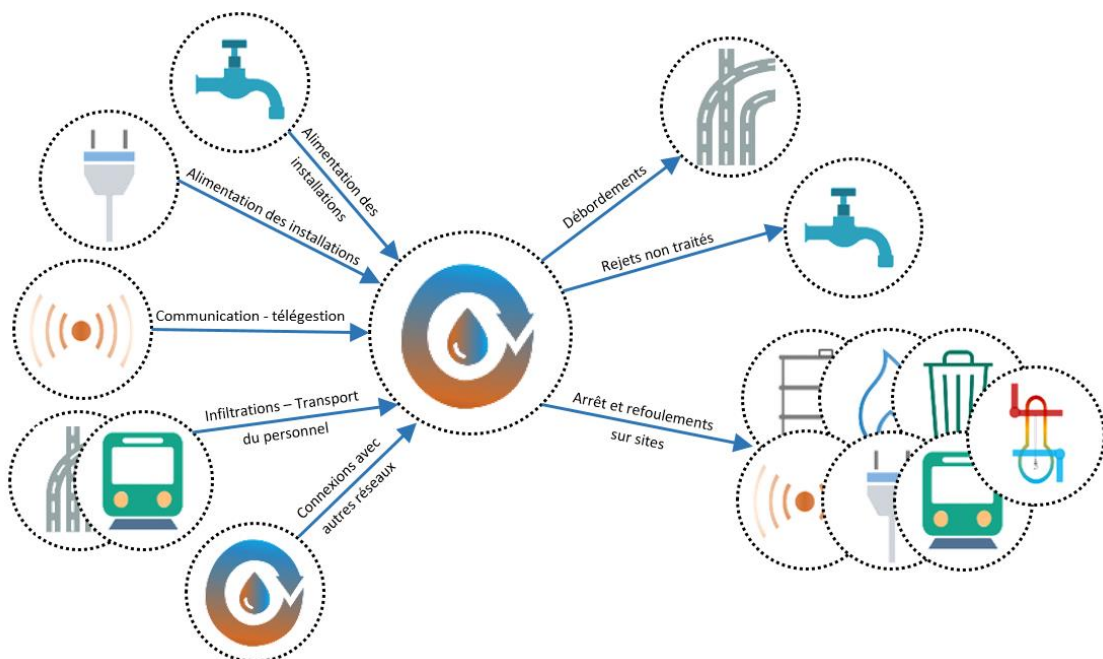


Figure 104 : Les principaux liens de dépendances entrantes et sortantes du réseau d'assainissement.

On rappelle que les liens de dépendances entrantes, identifiés dans le chapitre 1, pour les réseaux d'assainissement génériques sont relatives à l'alimentation électrique, les services de télécommunications, la voirie pour les bouches et l'accessibilité, le réseau enterré ferré pour les rejets et les transports en commun pour le transport des personnels.

### 8.2.3. Le réseau de gestion des déchets

Le réseau de gestion des déchets permet la collecte, le transport, et le traitement des différents déchets urbains. Le traitement des déchets peut consister en l'enfouissement, le recyclage, la valorisation énergétique ou la méthanisation de ces déchets. La gestion des déchets rentre dans les attributions du Syndicat Intercommunal de Traitement des Ordures Ménagères (SYCTOM) pour les 5 départements que sont Paris, les Hauts-de-Seine, la Seine-St-Denis, le Val-de-Marne et les Yvelines. Le Service Technique de la Propreté de Paris (STPP), au sein de la direction de la propreté et de l'eau (DPE), gère quant à lui la collecte des déchets de tous types, la gestion des déchetteries, et le nettoyage des rues dans la capitale. Ces missions sont réalisées en régie ou par des prestataires. Les centres de transfert, de tri et de valorisation des déchets permettent finalement d'incinérer et valoriser la majorité et de trier, stocker ou enfouir le reste. Ces centres peuvent directement être gérés par le SYCTOM ou par des entreprises privées.

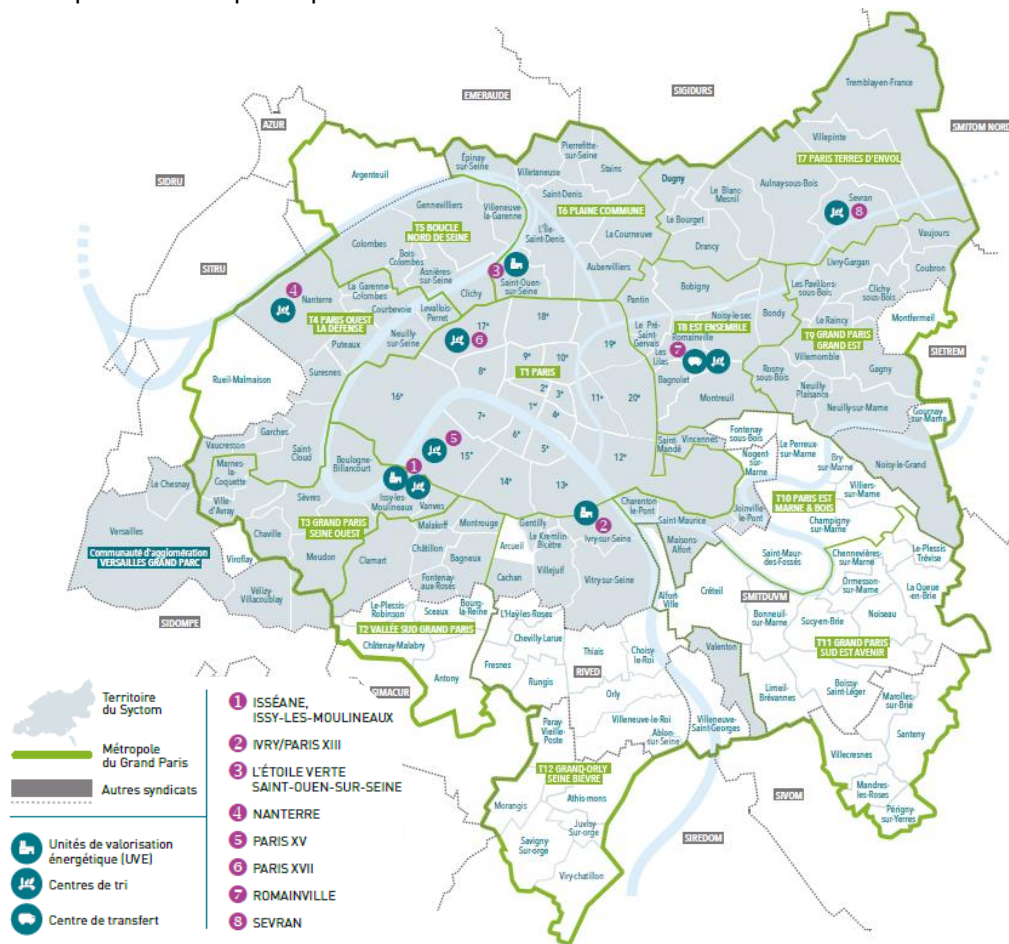


Figure 105 : Carte des installations du Syctom et de son périmètre d'action. Source : [www.syctom.fr](http://www.syctom.fr)

Au niveau des vulnérabilités, il est question à la fois des processus de collecte locaux et des traitements dans les centres. Les usines d'incinération d'ordures ménagères seront progressivement arrêtées entre les scénarios R0.6 et R0.8, que ce soit par leur inondation ou leur inaccessibilité. L'approvisionnement

en réactifs peut également être critique. Le traitement des encombrants et la moitié des centres de tri seront ensuite rapidement indisponibles. Les collectes sur les voies submergées seront par ailleurs interrompues, et les collectes sur le reste du territoire seront perturbées suite aux inondations de certains sites techniques tels que les garages et ateliers. Il serait alors fait appel à des centres de transferts de secours privés ou à certains équipements tels que le parc des expositions de Versailles. L'hippodrome de Vincennes devrait par ailleurs être réquisitionné pour stationner les 130 poids-lourds de la STPP et servir d'atelier et de site d'accueil du personnel.

Concernant les dépendances à d'autres réseaux, la gestion des déchets est tout d'abord dépendante à l'approvisionnement en carburant pour la collecte et le transport des déchets. Le carburant utilisé peut être du fioul ou du GNV (gaz naturel), et l'approvisionnement en gaz naturel est alors conditionné à sa production, qui dépend à son tour de l'électricité, par exemple. La gestion des déchets est également dépendante du bon état et de la non-submersion des chaussées ainsi que de l'accessibilité des sites techniques. L'eau peut également être nécessaire au nettoyage des voiries après le passage des eaux du fleuve.

L'électricité est par ailleurs nécessaire pour l'alimentation des centres et de leurs machines, et les télécommunications pour le transfert d'informations et la télégestion de certaines parties du réseau automatisées (collecte pneumatique par exemple). Des groupes électrogènes sont prévus pour les sites concernés par des vulnérabilités électriques. Les dysfonctionnements potentiels du réseau de gestion des déchets peuvent entraîner des impacts sur les conditions de vie, ainsi que l'encombrement des voies par les déchets non collectés et entassés. On souligne également la perturbation du chauffage urbain du fait de l'arrêt des centres d'incinération des ordures ménagères qui produisent la vapeur nécessaire au réseau de chaleur. Les dépendances entrantes et sortantes du réseau de gestion des déchets sont reprises dans la Figure 106.

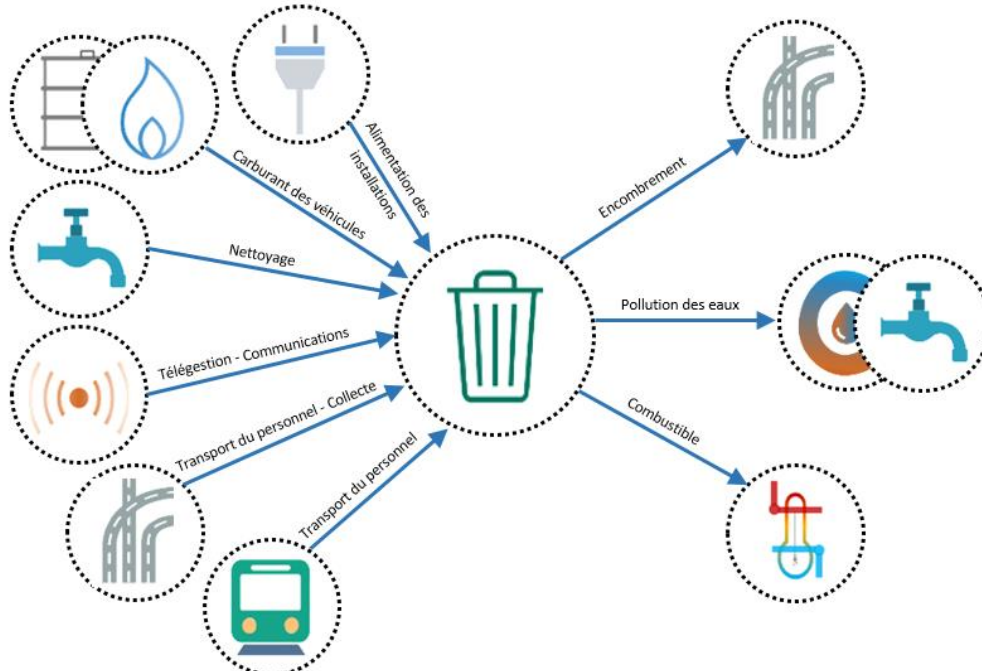


Figure 106 : Les principaux liens de dépendances entrantes et sortantes du réseau de gestion des déchets.

#### 8.2.4. Le réseau de gaz

Le réseau de gaz permet la production, le transport et la distribution de gaz. La distribution de gaz, généralement à moyenne et basse pression, relève d'une compétence des collectivités locales, qui

peut être assurée en régie ou concédée à des entreprises. 9 100 communes sont desservies en gaz naturel, ce qui concerne 76 % de la population, tandis que 11 millions de consommateurs sont raccordés directement aux réseaux de distribution de gaz naturel. Les deux acteurs principaux de ce réseau sont GrDF (en charge du réseau de distribution dans 80% des communes concernées, dont Paris) et GrTGaz (en charge du réseau de transport).

Deux autres acteurs peuvent également être considérés : Storengy (société chargée du stockage souterrain du gaz naturel) et Elengy (exploitante des terminaux méthaniers français). Ces quatre sociétés sont des filiales d'Engie, anciennement GDF Suez. Il est important de noter ici que l'emprise du réseau de gaz est nationale et non locale comme les réseaux précédents. Une crise majeure est alors gérée au niveau national et les moyens diffèrent d'un réseau local. Le réseau de distribution du gaz en milieu urbain est vulnérable aux infiltrations au niveau des postes de livraison, mais pas au niveau des canalisations étanches. Les portions de réseau basse pression immergées seront coupées et isolées car la pression interne serait insuffisante pour empêcher les entrées d'eau. Les potentielles remontées de nappe sont donc sources d'incertitudes quant au fonctionnement du réseau. La traversée souterraine de la Seine ne pose quant à elle pas de problème. La pénétration d'eau dans les conduites peut entraîner des surpressions sur les installations et des extinctions de flammes, pouvant causer des fuites de gaz. Les postes de détente seront également déposés avant l'arrivée de l'eau, et les canalisations en aval ne seront pas endommagées en cas d'enneigement.

Au niveau des dépendances aux autres réseaux, le réseau de gaz en tant que tel n'a pas besoin d'électricité pour fonctionner, mais les installations des clients nécessitent une alimentation électrique pour fonctionner. Il est estimé que les coupures se généraliseront à partir d'un scénario R1.0, et qu'elles concerneraient environ 10% des clients pour un scénario R1.15, sans considérer les dysfonctionnements du fait des coupures électriques chez les clients. La perturbation de l'alimentation en gaz peut notamment dégrader les conditions de vie, perturber des activités industrielles et commerciales, mais aussi perturber l'approvisionnement du réseau de chauffage urbain. Ces dysfonctionnements peuvent également potentiellement engendrer une augmentation des besoins en électricité ou en fioul. Les dépendances entrantes et sortantes du réseau de distribution de gaz sont synthétisées dans la Figure 107.

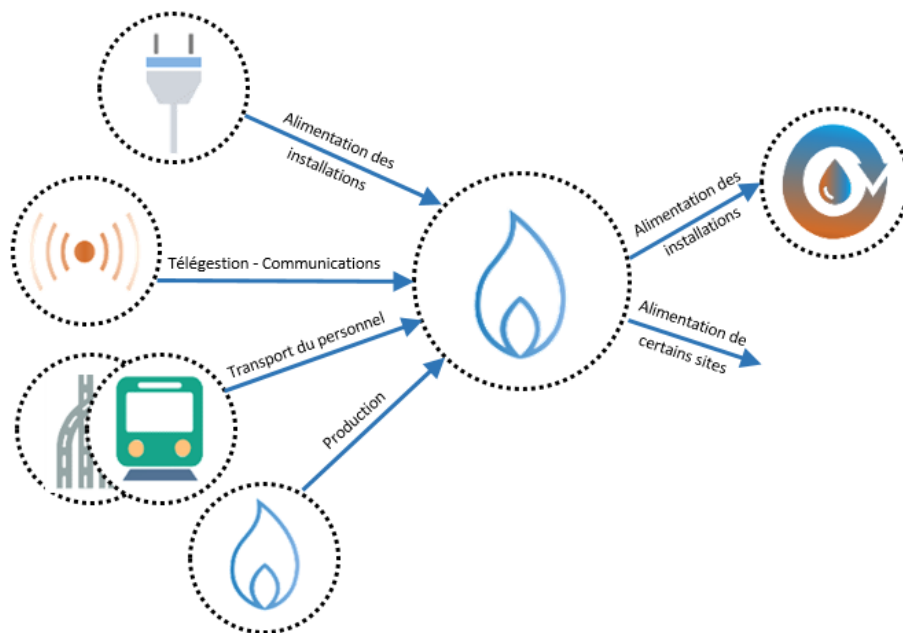
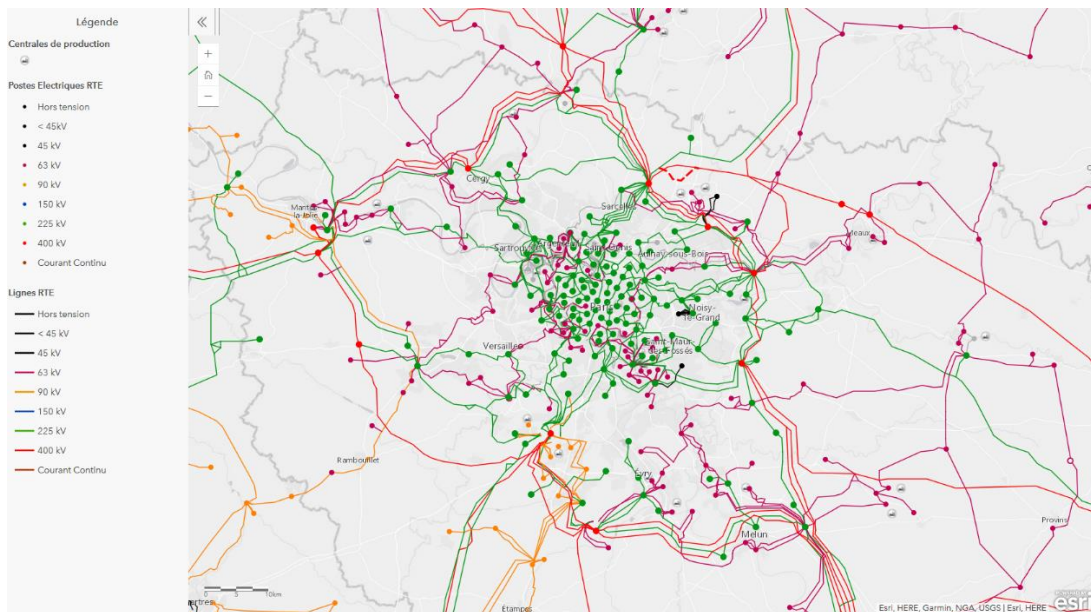


Figure 107 : Les principaux liens de dépendances entrantes et sortantes du réseau de distribution de gaz.

### 8.2.5. Le réseau d'électricité

Le réseau d'électricité permet la production, le transport et la distribution de l'électricité aux clients. En France, l'électricité est produite principalement par EDF (mais également par Véolia et Electrabel) et acheminée par le biais de lignes haute tension sous la responsabilité de RTE jusqu'à des postes de transformation. Ces postes visent à réduire la haute tension en moyenne et basse tension avant la distribution par Enedis (anciennement ErDF) jusqu'au consommateur final. Enedis est présente dans tous les départements et dessert 35 millions de clients (correspondant à des points de livraison), dont 6,2 millions en Ile-de-France. Pour l'agglomération parisienne, on distingue sur la Figure 108 une première boucle de 400 kV, puis une seconde boucle concentrique de 225 kV d'où partent des radiales vers les postes source. Ces radiales ne sont pas maillées, et c'est donc le réseau moyenne tension qui assure le rôle habituel de la haute tension (Grangeat, 2017).



Sachant que 90% du réseau de lignes électriques en Ile-de-France est souterrain, la vulnérabilité du réseau électrique à l'inondation est importante. Celui-ci est vulnérable aux infiltrations, à la submersion, aux ruptures de conduites et à la dégradation des installations. Certaines installations telles que certains postes sources et certains postes de distribution sont inondables et doivent donc être déposés ou protégés. Des coupures préventives ciblées sont effectuées en fonction de la montée des eaux, puis des coupures sont effectuées au niveau des postes sources au dernier moment et par télécommande. Si l'eau touche un équipement sensible avant la coupure, tout le matériel doit être changé. Un poste de distribution publique sur cinq est télécommandé, les autres doivent être coupés manuellement. Tous les postes sources sont quant à eux télécommandables. Si un poste dessert une zone en partie inondée, celui-ci est coupé. C'est pourquoi certaines zones non-inondées sont cependant coupées en électricité.

Certains postes sources seront donc protégés de l'eau et coupés, notamment à Paris. Des processus de redispatching et d'isolation de certains secteurs, ainsi que des solutions mobiles palliatives telles que des groupes électrogènes sont prévues. La force d'intervention FIRE a alors pour mission le rétablissement rapide (90% des clients doivent être réalimentés en moins de 5 jours après le départ des eaux). Les impacts attendus des dysfonctionnements du réseau de distribution d'électricité sont nombreux et critiques. Le réseau électrique est en effet un des plus agressifs, car la grande majorité des infrastructures, services, sites, réseaux est dépendante de leur alimentation électrique. On réalise

que l'éclairage, l'alimentation de l'électroménager, le chauffage électrique, les ascenseurs sont directement dépendants de leur alimentation électrique dans les habitations. Mais les transports en commun (la RATP est dépendante de RTE pour le courant moteur et d'Enedis pour le reste), les télécommunications ou encore les installations permettant l'arrivée des fluides dans les habitations sont également dépendants de leur alimentation. Les dépendances entrantes et sortantes du réseau de distribution d'électricité sont synthétisées dans la Figure 109.

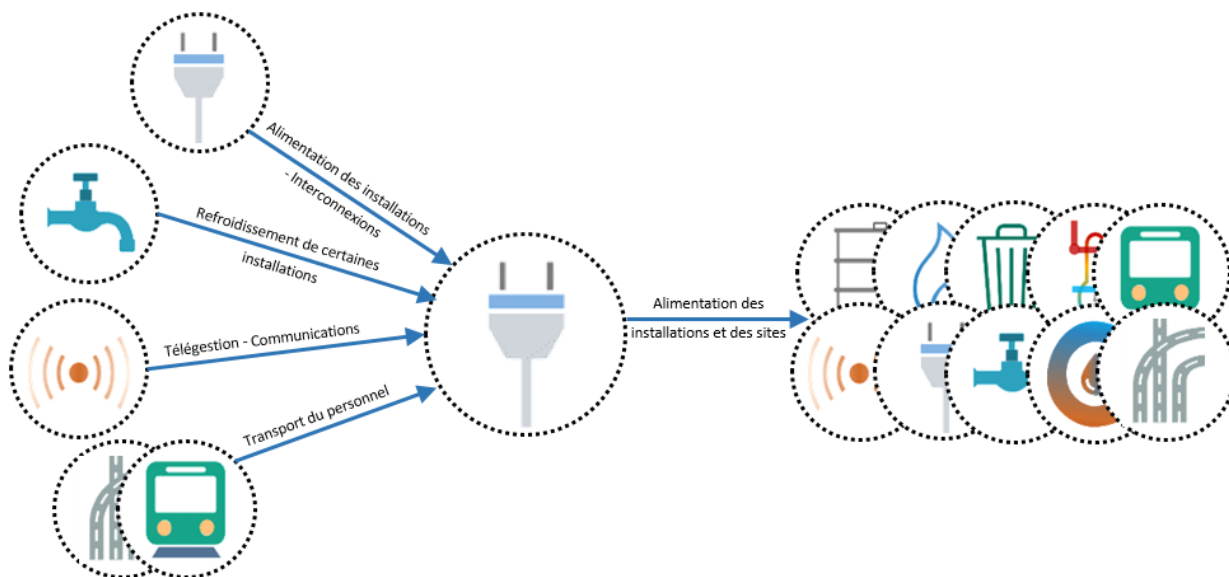


Figure 109 : Les principaux liens de dépendances entrantes et sortantes du réseau de distribution d'électricité.

### 8.2.6. Le réseau d'hydrocarbures

Le réseau d'hydrocarbures permet la production (ou l'import), le transport et le stockage des hydrocarbures sur le territoire national. Étant donnée l'échelle supra-départementale de fonctionnement de ce réseau, l'interaction avec les autorités publiques ne se fait pas à l'échelle locale. Seules 11 000 stations essences subsistent aujourd'hui en France métropolitaine, ce qui fait que leur approvisionnement ne concerne pas toutes les communes. Cependant des stations essences sont présentes dans la majorité des villes de notre zone d'étude.

On rappelle que les liens de dépendances entrantes identifiées pour les réseaux génériques au chapitre 1 sont les dépendances à l'alimentation électrique des installations, les télécommunications pour la gestion et la voirie pour l'accès aux installations et le transport des matières.

Les matières hydrocarbures sont acheminées par pipelines depuis les grands ports français, notamment par la société des transports pétroliers par pipeline (TRAPIL) qui exploite trois réseaux de pipelines en France. Ces produits sont ensuite acheminés par camions jusqu'aux sites de consommation, dont les stations-services. La majorité des hydrocarbures en agglomération parisienne provient du Havre (Toubin, 2014).

Ce réseau est robuste car de nombreux vecteurs permettent de transporter la matière à destination. Les points de stockage sont généralement protégés pour une certaine montée des eaux, mais les oléoducs sont vulnérables aux éventuelles collisions et courants forts. Ceux-ci fonctionnent d'ailleurs grâce à des pompes alimentées en énergie, ce qui souligne la dépendance à l'alimentation électrique.

La perturbation de la distribution d'hydrocarbures pourrait avoir des conséquences importantes, que ce soit pour les déplacements ou l'alimentation des groupes électrogènes, pour les gestionnaires mais aussi pour la population.

### 8.2.7. Le réseau de fluides calorifiques

Les réseaux de fluides calorifiques permettent la production, le transport et la distribution de fluides de chauffage ou de refroidissement aux bâtiments desservis. Le réseau de chauffage urbain livre de la chaleur (le fluide transporteur peut être de l'eau chaude ou de la vapeur) à une sous-station en pied d'immeuble, qui la transforme en eau chaude utilisée pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire.

Le chauffage assuré par un réseau de chauffage urbain est composé d'un réseau primaire et d'un réseau secondaire. Le réseau primaire fait l'objet d'un contrat de délégation de service public. Il est alimenté par les installations de production de chaleur (géothermie, incinération, chaufferie au fuel/bois/gaz...) qui circule de manière souterraine jusqu'aux sous-stations (échangeurs) situées au pied de chaque immeuble. Les eaux de chauffage et sanitaires sont chauffées dans des sous-stations puis acheminées dans les différentes parties du bâtiment via le réseau secondaire.

Ce réseau de distribution interne fait l'objet d'un autre contrat souscrit par chaque abonné (copropriété, bailleur social etc.) avec une société d'exploitation. Le déploiement du réseau peut être à l'initiative d'un opérateur privé, mais la compétence est souvent prise par une collectivité. Dans ce cas-là, le service est délégué à un tiers qui prend la responsabilité du bon fonctionnement du réseau, mais toujours sous le contrôle de la collectivité délégante.

Au niveau de l'agglomération parisienne, on distingue plusieurs réseaux de chaleur distincts, gérés par différents acteurs et présentés par la Figure 110. La compagnie parisienne de chauffage urbain gère le plus important des réseaux, et celui qui est le plus vulnérable à la crue.

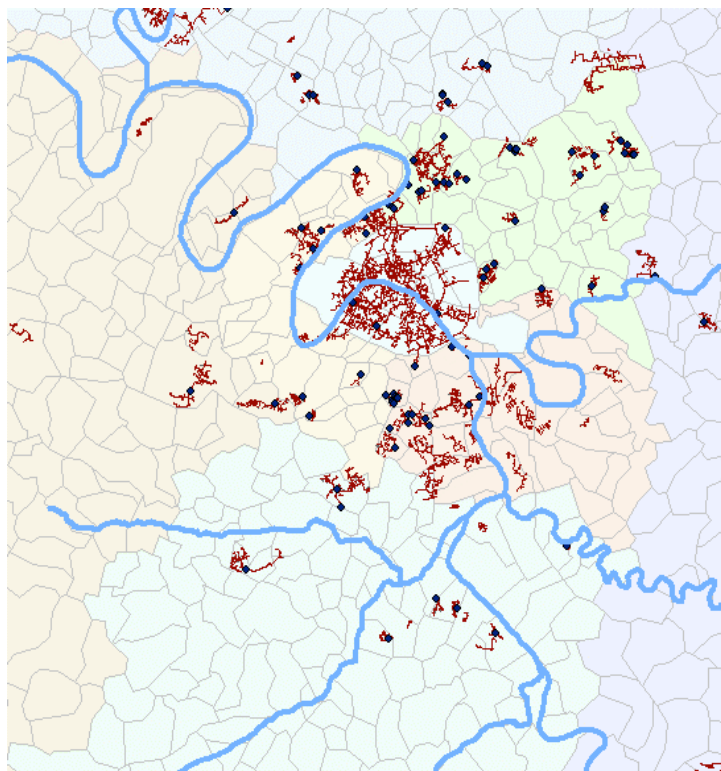


Figure 110 : Cartographie des emprises des réseaux de chauffage urbain en Ile-de-France. Source des données : DRIEE IDF.

Le refroidissement assuré par un réseau collectif distribue généralement de l'eau très froide et fonctionne selon le même principe qu'un réseau de chauffage. L'échange avec le fluide froid se fait chez le client et sert généralement à la climatisation des locaux, au refroidissement des serveurs informatiques ou au maintien de l'hygrométrie. Ce sont donc principalement les immeubles de bureaux, les musées, les supermarchés, les data-centers et les centres de santé qui y sont raccordés. Pour notre zone d'étude, Climespace (filiale d'Engie) est l'opérateur le plus important, et le concessionnaire de la ville de Paris. Ce réseau est l'un des plus importants au monde et le premier en Europe. Le quartier de La Défense est également desservi par un réseau de chauffage et de froid urbain, géré par Enertherm.

### Réseau de chaud

Les réseaux de chauffage urbain sont vulnérables à la perturbation des ressources extérieures, notamment au niveau des centrales de production du chaud ou du froid. Celles-ci peuvent en effet fonctionner au gaz, au fioul (transporté par barge), au charbon, mais aussi grâce à la valorisation des ordures ménagères. De plus, la plupart de ces sites sont en bordure de Seine et vulnérable à la montée des eaux. Le réseau de distribution se trouve quant à lui sous la voirie, en caniveau et 15% de ces ouvrages sont en zone inondable. Les ventilations représentent alors des points d'entrée potentiels de l'eau. Les sites en zone inondable, et notamment les hôpitaux, ne seront donc plus chauffés.

Concernant les dépendances autres que les ressources combustibles, la CPCU n'est pas dépendante de l'électricité pour faire fonctionner le réseau, mais la régulation des vannes de livraison en dépend, ce qui veut dire qu'après les coupures électriques, la livraison de vapeur sera maintenue dans des conditions identiques. A partir du compteur en sous-sol d'immeuble, la responsabilité passe au client. Le bon fonctionnement du réseau est également dépendant des télécommunications pour la télégestion et des transports pour les accès sur site si besoin. Les dépendances entrantes et sortantes du réseau de chauffage urbain sont synthétisées dans la Figure 111.

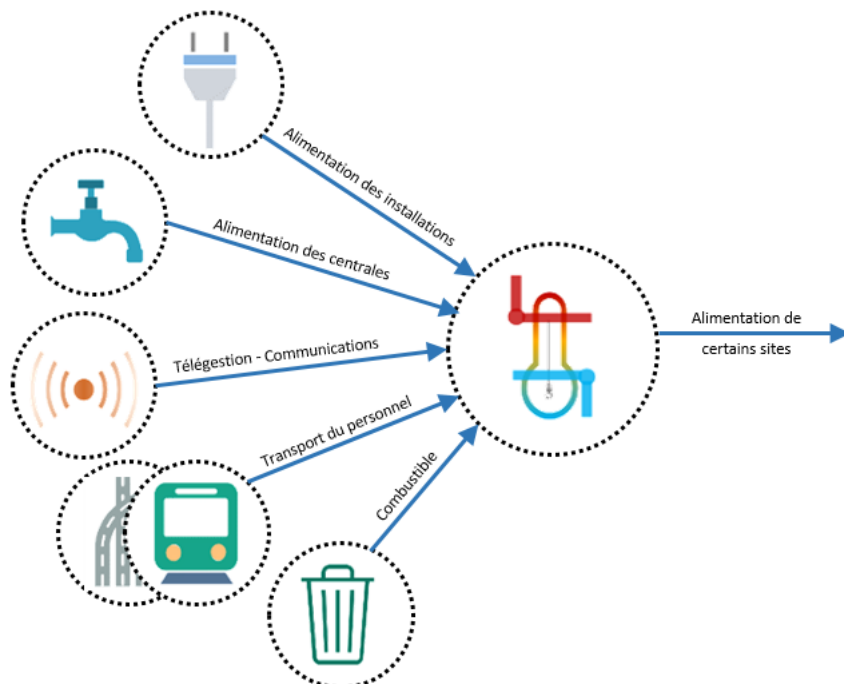


Figure 111 : Les principaux liens de dépendances entrantes et sortantes su réseau de chauffage urbain.



## Réseau de froid

Le réseau de froid est composé de trois réseaux distincts pouvant être gérés de manière individuelle, et utilise l'eau de la Seine pour refroidir l'eau du réseau. Plusieurs centrales ponctuelles sont installées, en complément des centrales alimentant ces trois réseaux, pour desservir des enjeux particuliers, tels que la Philharmonie ou le Palais de Tokyo. Les centrales sont vulnérables à la montée des eaux et fonctionnent à l'électricité. Elles sont également gérées à distance (et ne nécessitent pas la présence de personnel) et sont donc dépendantes des télécommunications, de même que les postes de livraison dans les sous-sols des clients. Il est à souligner que ces centrales sont souvent situées au niveau d'emprises de la RATP, du bailleur SemPariseine voire de la CPCU, ce qui peut poser des difficultés d'accessibilité et de coordination.

Les postes peuvent être impactés par la montée des eaux et comporter des équipements électroniques, mais peuvent éventuellement fonctionner en mode dégradé sans électricité et sans télécommunications. Le réseau de canalisations a quant à lui été prévu pour être ennoyé, et n'est pas dépendant de l'électricité pour fonctionner (les pompes étant situées dans des centrales). Il pourrait continuer à fonctionner malgré les pertes thermiques. Les impacts potentiels des dysfonctionnements au sein des réseaux de chaleur et de froid peuvent aller de l'arrêt du chauffage dans des habitations ou des sites divers (entraînant l'évacuation des hôpitaux) à la perturbation de certaines activités nécessitant du froid par exemple.

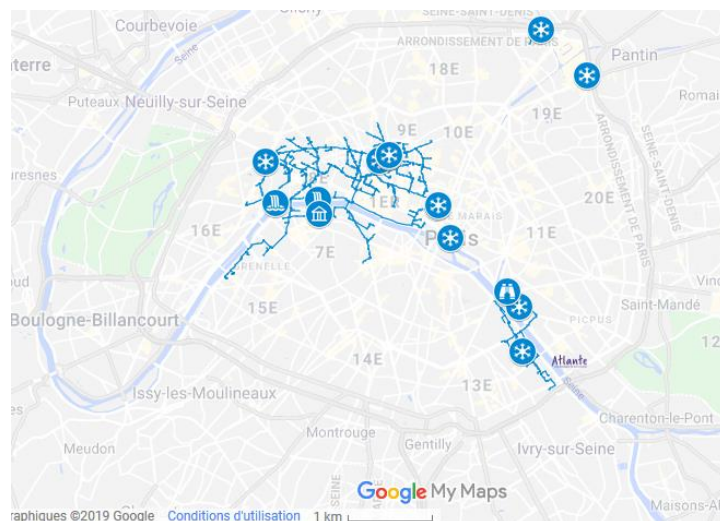


Figure 112 : Cartographie du réseau de froid de Climespace. Source : <http://atlante.fr/blog/le-reseau-urbain-de-froid-de-paris-une-concession-face-a-la-transition-energetique/>

### 8.2.8. Le réseau de télécommunications

Le réseau de télécommunications permet d'assurer les communications au moyen de réseaux filaires, en cuivre, en fibre optique ou par les ondes. On peut distinguer la téléphonie fixe, la téléphonie mobile, et le réseau Internet, qui se recoupent souvent dans leur fonctionnement. Ce type de réseau est ouvert à la concurrence et 4 opérateurs se partagent ainsi la gestion des installations et du service sur le territoire français : Orange, SFR-Numéricâble, Bouygues Telecom et Free.

Le réseau de télécommunications est vulnérable à la submersion de ses installations mais aussi à la coupure d'alimentation électrique et, dans certains cas, à la coupure de l'alimentation en eau utilisée pour le refroidissement de certaines installations. Les hydrocarbures sont également nécessaires pour

l'alimentation des véhicules d'intervention ainsi que pour l'alimentation des groupes électrogènes. L'accessibilité aux différents sites est bien sûr nécessaire.

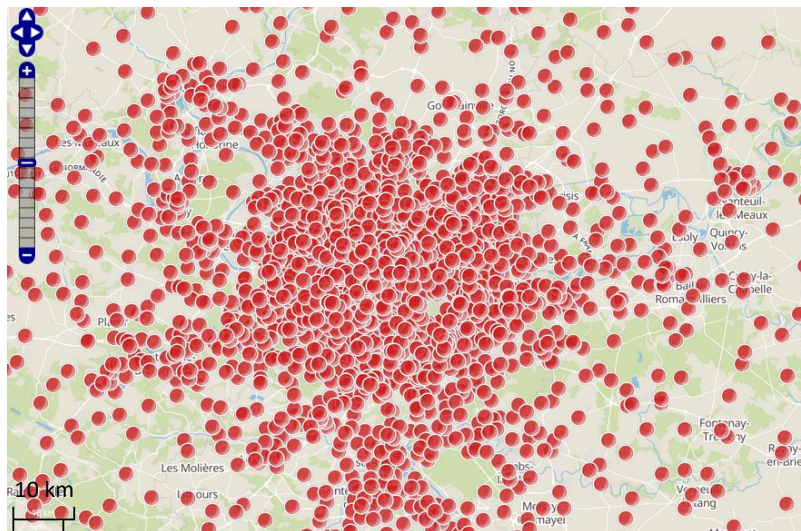


Figure 113 : Cartographie de l'implantation des antennes mobiles de l'opérateur SFR au niveau de l'agglomération parisienne. Source : <https://www.antennesmobiles.fr/>

Orange a les responsabilités collectives sur le réseau de téléphonie mobile et a établi des mesures préventives générales à mettre en place du côté de l'opérateur ou du côté du client. Elles visent à maintenir le plus longtemps possible la continuité d'activité. Les différents opérateurs sont soumis à de fortes (inter)dépendances les uns envers les autres, notamment au niveau des infrastructures, car certaines sont utilisées par plusieurs opérateurs. Les opérateurs de télécommunications prioriseront l'accès à la voix plutôt qu'à la data. Des groupes électrogènes sont prévus en nombre (tels que des groupes fixes, des groupes mobiles, un contrat de fourniture avec Enedis...) pour pallier les coupures d'alimentation électrique, ainsi qu'une réorganisation du réseau et des zones couvertes par les antennes (réazimutage). L'arrêt des télécommunications peut finalement entraîner des difficultés de gestion des autres réseaux par la télégestion, et des difficultés de communication entre acteurs mais aussi entre les équipes d'un même gestionnaire. La remise en service deviendrait également problématique. Les dépendances entrantes et sortantes du réseau de chauffage urbain sont synthétisées dans la Figure 114.

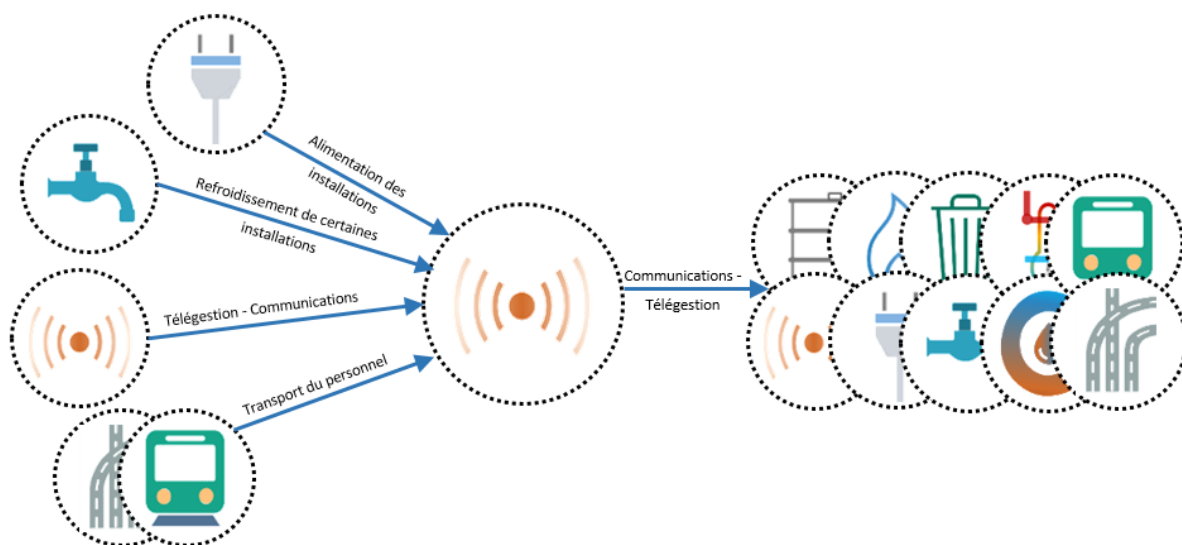


Figure 114 : Les principaux liens de dépendances entrantes et sortantes du réseau de télécommunications.

### 8.2.9. La voirie

Le réseau de voirie est composé des différentes catégories de voies de circulation terrestre permettant le déplacement de véhicules motorisés ainsi que des piétons et des véhicules non-motorisés pour certaines. On distingue ainsi les voiries de niveau communal, départemental, national et les autoroutes. Le réseau de voirie permet notamment le fonctionnement du réseau de transport public de bus. L'organisation professionnelle des transports d'Ile-de-France (Optile) est l'organisation regroupant l'ensemble des entreprises privées exploitant des lignes d'autobus régulières inscrites au plan de transport de la région.

#### *Paris*

La Direction de la Voirie et des Déplacements de la Ville de Paris est chargée de la gestion et de l'exploitation du domaine public viaire. Elle gère la politique de déplacement et de stationnement dans la capitale. L'éclairage public est géré par la société EVESA, qui a la responsabilité de l'exploitation et du maintien du parc lumineux de Paris, du boulevard périphérique et des deux bois de Boulogne et Vincennes. La régulation de trafic est gérée par un service dédié depuis l'Île de la Cité où se trouve le poste central (PC Lutèce) de gestion du trafic dans la capitale.

#### *Reste de l'agglomération*

Pour les communes voisines, la gestion des différents tronçons de voirie dépend du type de voirie considéré. Les voies communales appartiennent aux communes, ou à une communauté de communes. Les routes départementales appartiennent aux départements et des services routiers dédiés les gèrent. Les routes nationales appartiennent à l'Etat, et les services routiers dédiés sont sous l'autorité de la direction générale des infrastructures, des transports et de la mer au sein du ministère des transports. Les autoroutes peuvent être concédées ou non concédées (sans péage). Elles appartiennent toutes à l'Etat mais les premières voient leurs finance

ment, construction, entretien et exploitation confiés à des sociétés concessionnaires tandis que les deuxièmes sont également gérées par les services routiers de l'Etat. Les routes nationales et les autoroutes d'Ile-de-France sont gérées par la direction des routes d'Ile-de-France.

Le réseau de voirie est principalement vulnérable à la submersion et l'endommagement des voiries. Cet endommagement dépend entre autres du niveau et de la durée de la submersion. Le montage de protection est prévu à de nombreux points sensibles le long des cours d'eau, notamment au niveau des rampes d'accès et des quais. Le débordement (ou la défaillance) des protections anti-crue n'est pas envisagé à Paris, alors qu'il l'est dans le reste de l'agglomération, où ce type de protections n'est pas toujours disponible.

Le réseau dépend du réseau d'éclairage public et de signalisation (et donc des services de régulation du trafic). Les candélabres sont alimentés directement par le réseau électrique en rive droite, et par un réseau dédié alimenté par des transformateurs en rive gauche. L'éclairage est donc dépendant de l'alimentation électrique, et l'alimentation par les câbles souterrains doit être coupée en cas d'immersion pour raison de sécurité. L'alimentation de la signalisation est également dépendante de l'électricité, et des groupes électrogènes sont alors nécessaires pour réalimenter un carrefour par exemple. Le PC Lutèce est inondable car situé en sous-sol de l'île de la Cité, et vulnérable à des infiltrations. Pour l'instant il n'est pas prévu de site de repli, ce qui entraînerait l'arrêt de la régulation mais des feux qui continueraient à fonctionner en mode de secours préenregistré. La voirie peut également être impactée par l'encombrement dû aux déchets et aux débordements du réseau

d'assainissement. Les déplacements peuvent également être impactés par le manque d'hydrocarbures, servant de carburant aux différents véhicules.

Les effets de dysfonctionnements de ce réseau peuvent être très nombreux et divers. Ils peuvent en effet empêcher l'accessibilité à certains sites et concerner les déplacements domicile-travail (notamment pour les salariés des différents gestionnaires), domicile-école (notamment pour les parents ne pouvant plus emmener leurs enfants à l'école et contraints de les garder), mais aussi les interventions sur les différents sites des réseaux techniques. Les dépendances entrantes et sortantes du réseau de chauffage urbain sont synthétisées dans la Figure 115.

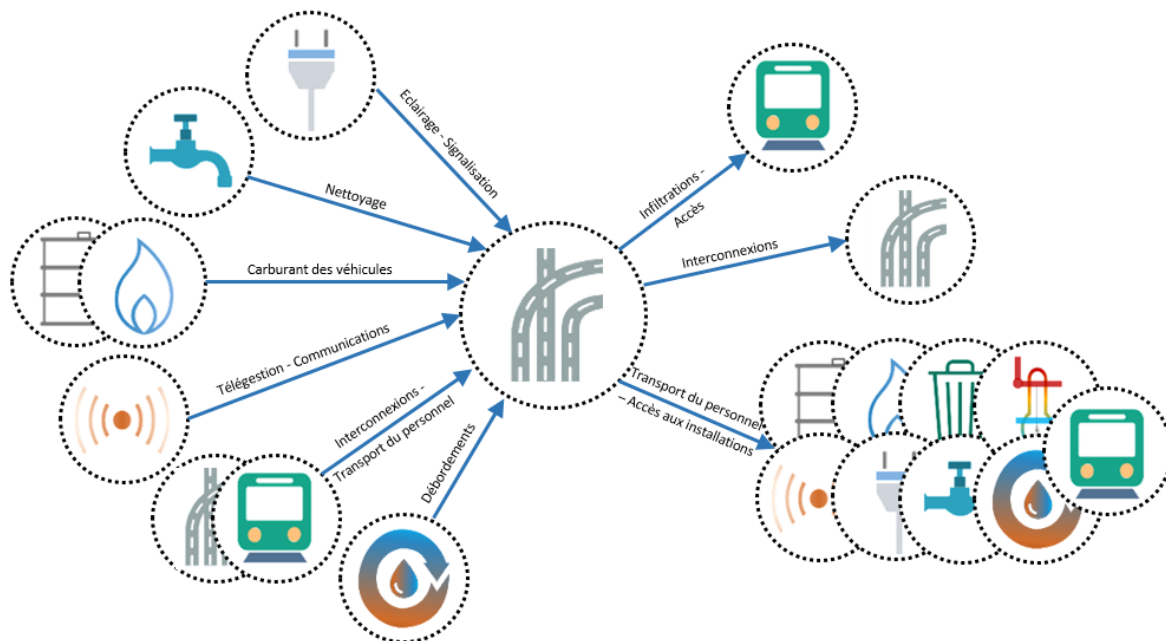


Figure 115 : Les principaux liens de dépendances entrantes et sortantes du réseau de voirie.

### 8.2.10. Les transports ferrés

Le réseau de transports ferrés permet le déplacement d'usagers ou de biens à l'aide de véhicules circulant sur des voies ferrées. Les transports publics sont organisés à différentes échelles (nationale, régionale, interurbaine, urbaine...) selon différents modes (TGV, TER, RER, métro, tramway...). Les transports publics urbains (ferrés ou non) relèvent de la compétence communale ou intercommunale, sous la responsabilité de l'autorité des transports (AOT). De nombreux acteurs interviennent dans notre zone d'étude à ce sujet. Le Syndicat des transports d'Île-de-France (STIF), est l'autorité organisatrice des transports de la région Île-de-France. Les membres du STIF sont la région Ile-de-France et ses 8 départements.

La régie autonome des transports parisiens (RATP) assure l'exploitation d'une partie des transports en commun de Paris et de sa banlieue. Elle exploite les seize lignes du métro de Paris, huit des lignes du tramway d'Île-de-France (la ligne T4 étant exploitée par la SNCF), une partie des lignes de bus d'Île-de-France, et une partie des lignes A et B du réseau express régional d'Île-de-France (RER). La société nationale des chemins de fer français (SNCF) est l'entreprise ferroviaire publique qui exploite notamment les trains de banlieue sur les lignes H, J, K, L, N, P, R et U du Transilien, la totalité des lignes C, D et E du RER et une portion des lignes A et B, ainsi que la ligne T4 du tramway.

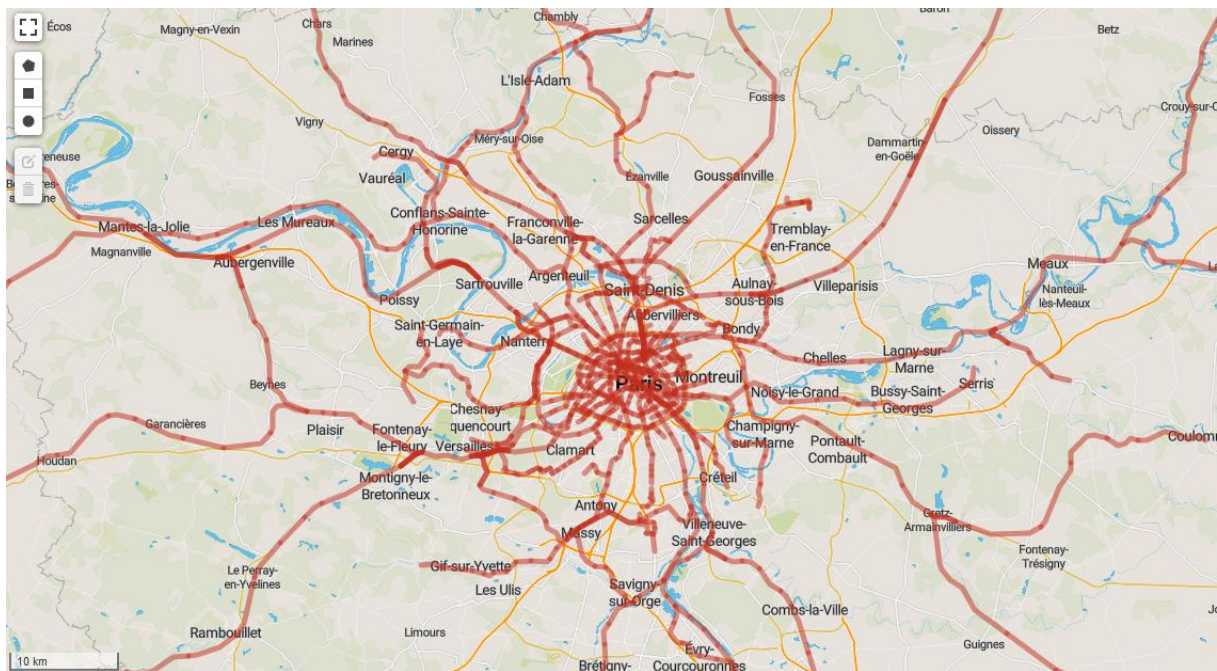


Figure 116 : Cartographie du réseau ferré de l'agglomération parisienne. Source : <https://data.iledefrance-mobilites.fr>

Le réseau ferré est vulnérable à la submersion de ses voies et de ses installations, à l'inaccessibilité mais aussi à l'endommagement de celles-ci. Les entrées de stations peuvent en effet représenter des entrées d'eau potentielles, et les diverses connexions et infiltrations souterraines peuvent être autant de vecteurs d'arrivée d'eau. L'objectif est donc d'empêcher les entrées d'eau depuis la voirie (473 entrées d'eau comptabilisées pour le réseau RATP, dont les bouches d'aération) ou les souterrains du réseau. De nombreuses protections (constructions en maçonnerie, parois étanches, batardeaux, aqua-barrières...) sont prévues pour protéger ses points de vulnérabilité.

L'évacuation du matériel roulant des zones inondables est prévue, ainsi que le démontage d'installations électriques. Le lestage des voies par des trains lourds voire par la mise en eau volontaire et contrôlée est également considéré pour le cas particulier du tunnel du RER C.

La question de l'accessibilité des sites pour les salariés, très nombreux et nécessaires au fonctionnement du réseau est centrale et des travaux sont en cours pour déterminer les trajets empêchés par la crue et les répartitions des salariés pertinentes (Lhomme et al., 2019a).

Ce réseau est également dépendant de l'alimentation énergétique, et des groupes électrogènes sont prévus mais insuffisants pour garantir la continuité d'activité. Il peut être également vulnérable aux débordements du réseau d'assainissement, dont il est dépendant pour l'absorption des nombreux pompages nécessaires au niveau souterrain. La question des télécommunications est critique, et des travaux concernant des réseaux sécurisés isolés, satellitaires et radio sont à l'étude.

La RATP est alimentée par RTE par le biais de voies aériennes à 63kV, qu'elle transforme en 20kV. Une ligne électrique sécurisée interconnecte les postes de transformation et les postes d'épuisement (groupes de pompes, armoires de commande, tuyauterie, clapets, vannes, automates...). RTE estime que l'alimentation de la RATP en haute tension ne subira pas de perturbations en cas de crue majeure. Enedis alimente cependant en basse tension les installations servant à l'éclairage et à l'alimentation des stations, ainsi que certains postes d'épuisement. Concernant la RATP, l'évacuation et le démontage

des installations électriques doivent être réalisés plusieurs jours avant la coupure d'électricité (au moins 5 ou 6 jours), et doit donc être anticipée.

Des initiatives concernant la sécurité publique sont prévues au niveau des transports ferrés, tels que des points de regroupement ferroviaire pour les évacuations, le désenclavement des zones inondées par les emprises ferroviaires, et l'assistance aux pouvoirs publics pour les transports sanitaires. Des lignes de bus pour pallier les coupures de métro et RER sont également prévues en surface.

Les dépendances entrantes et sortantes du réseau de transport ferré sont synthétisées dans la Figure 117.

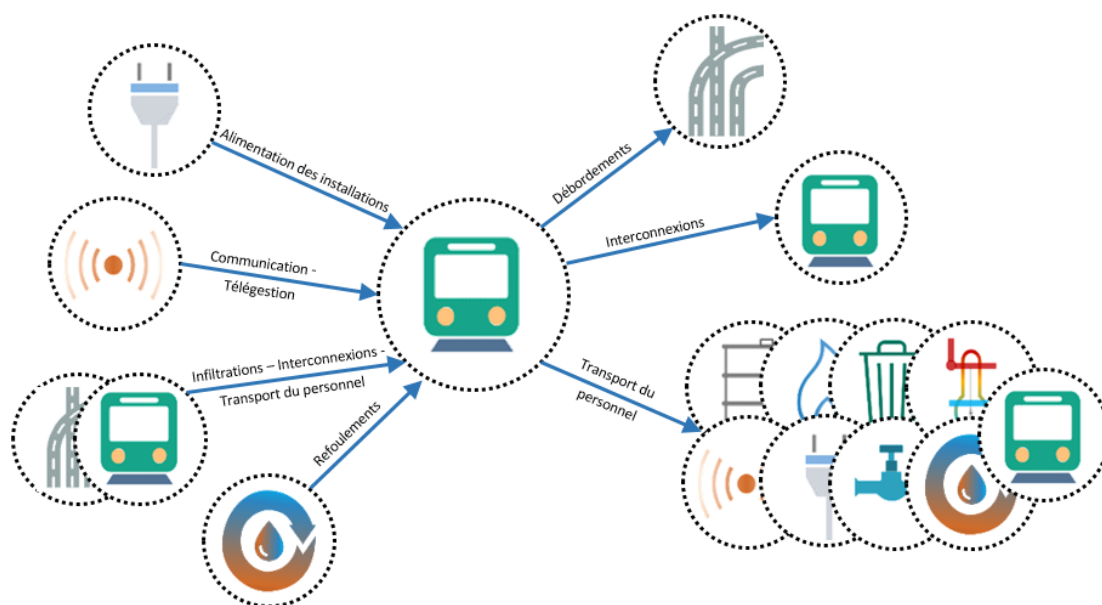


Figure 117 : Les principaux liens de dépendances entrantes et sortantes du réseau de transports ferrés.

### 8.3. LA GESTION DES (INTER)DEPENDANCES ET DEFAILLANCES EN CASCADE : UNE VISION D'ENSEMBLE

#### 8.3.1. La considération de la problématique des défaillances en cascade

Les gestionnaires de réseaux et les parties prenantes de la gestion d'une crue sont bien conscients du risque de crue majeure, mais la conscience et la connaissance des impacts indirects engendrés par les (inter)dépendances et les défaillances en cascade semblent moins partagées. Il apparaît que les répondants à l'enquête conçoivent tous le concept du phénomène de défaillance en cascade, mais n'utilisent pas de façon opérationnelle ce terme et ne partagent pas de définition commune. Le Tableau 43 reprend les définitions données par les répondants, et permet de souligner leur diversité.

L'accent est plutôt donné sur les dépendances directes, entrantes ou sortantes, identifiées pour la majorité depuis plusieurs années (Toubin, 2014). La chaîne de défaillances successives n'est pas toujours conceptualisée par les parties prenantes, notamment du fait du nombre limité d'exemples réels et de retours d'expériences passées.

Le concept de défaillances en cascade en conséquence d'une crue est par ailleurs généralement associé à des (inter)dépendances externes plutôt qu'internes. Les différents dominos représentent donc des réseaux et non des infrastructures dans l'esprit de la grande majorité des répondants. Les répondants ne considèrent pas une chaîne de défaillances ou dysfonctionnements en interne, c'est-à-dire entre plusieurs de leurs infrastructures, comme une défaillance en cascade (ou comme un effet domino). Ces événements, d'occurrence plus fréquente, sont gérés comme une variable de la gestion quotidienne de ces réseaux complexes.

Tableau 43 : Définitions de « défaillance en cascade » utilisées par les répondants

|              | Définitions du concept de "défaillance en cascade"  |
|--------------|---|
| Enedis IFO   | Par exemple, une défaillance au niveau des télécommunications empêche la transmission d'informations à notre système de conduite du réseau électrique.  |
| Enedis Paris | Concept global de la tombée des dominos (représentant les réseaux) un à un, selon le poids qu'ils ont dans le système. Notion d'amont et d'aval, et d'ordre chronologique et logique.   |
| GDRF         | Il s'agit de la défaillance d'un réseau entraînant la défaillance d'un autre réseau, et ainsi de suite.   |
| RATP         | L'arrêt d'un service ou d'une fourniture génère des interruptions de fonctionnement de services dépendants. Expression non employée mais concept compris.   |
| SIAAP        | "Tombée des réseaux un à un". Concept pris en compte en planification, même si le terme n'est pas utilisé en tant que tel.  |
| SFR          | Cela signifie que des impacts subis par un réseau urbain peuvent provoquer des impacts en chaîne sur d'autres réseaux qui en dépendent, même si ces derniers ne sont pas directement impactés. Il peut s'agir aussi de dépendances au sein d'un même réseau, si la perte de certaines composantes entraîne la perte d'autres composantes reliées. |
| SNCF         | Terme non employé en tant que tel par la SNCF mais concept pris en compte.  |
| SEDIF        | Perte de continuité de service d'un opérateur (stratégique) entraînant la perte d'activité d'un autre et ainsi de suite.  |
| CPCU         | Cela signifie que la défaillance d'un réseau entraîne la défaillance d'un réseau dépendant.   |
| EdP          | Les défaillances en cascade sont des effets domino, avec une suite de défaillances en conséquence des interdépendances au sein des réseaux.   |
| VEOLIA       | Défaillance suite à une ou plusieurs défaillances d'autres opérateurs. Effet dominos.   |

Concernant la survenue de défaillances en cascade, la moitié des répondants avait connaissance de phénomènes ayant pris place dans leur réseau dans le cadre d'une crue, que ce soit par le biais de dépendances externes ou internes (cf. Figure 118). Certains répondants déclarent cependant ne pas avoir observé d'effets cascade au sein de leur réseau, même si la quasi-totalité des répondants est consciente de l'éventualité de ces phénomènes pour leur réseau, que ce soit à la suite de dépendances internes ou externes (cf. Figure 119).

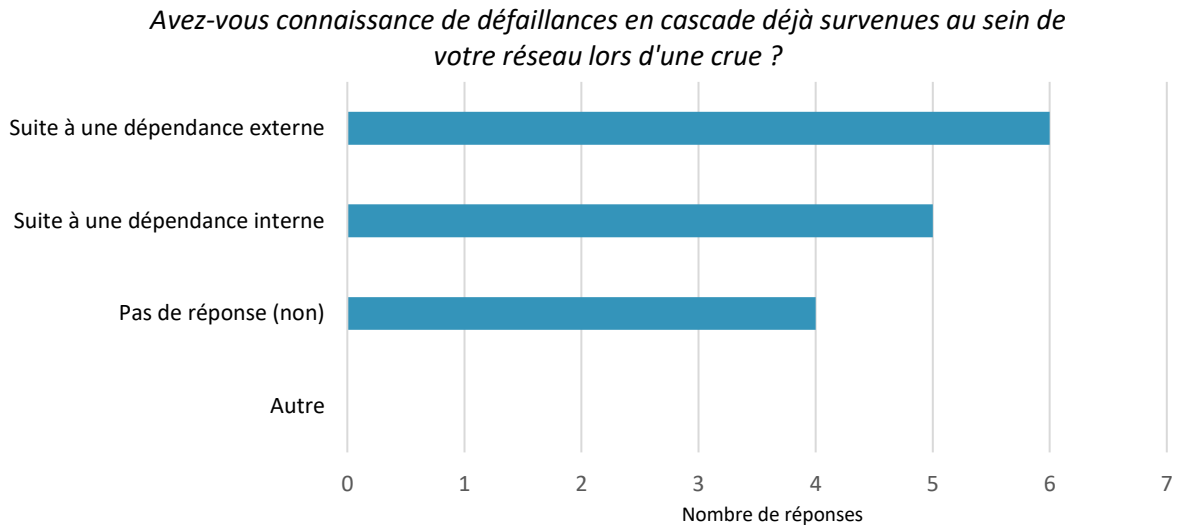


Figure 118 : Les types de défaillances en cascade déjà survenues au sein des réseaux lors d'une crue.

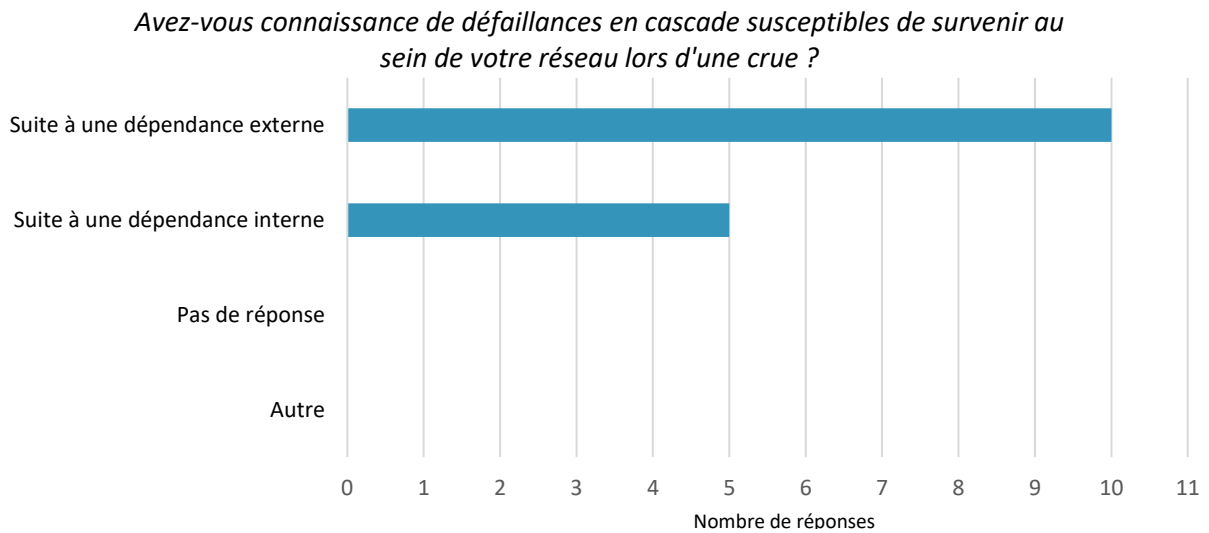


Figure 119 : Les types de défaillances en cascade susceptibles de survenir au sein des réseaux lors d'une crue.

L'enquête a également permis de montrer que 80% des répondants n'ont pas connaissance de phénomènes de défaillances en cascades survenus au sein d'autres réseaux à la suite d'une dépendance à leur service au cours d'une crue, ce qui peut sembler surprenant. Ce résultat peut potentiellement être corrélé avec l'ancienneté du répondant au poste occupé, qui est en moyenne de 3 ans. De plus, les opérateurs ne sont pas toujours conscients des répercussions des défaillances passées de leur réseau.

90% des répondants sont tout de même conscients qu'une dépendance à leur service pourrait être à l'origine d'effets cascade au sein d'autres services. Les opérateurs de transport sont par exemple tout à fait lucides quant à la problématique du transport des salariés de l'ensemble des opérateurs. L'opérateur de télécommunications rencontré considère également avec attention les dépendances de certaines postes sources électriques au service de télécommunications pour la téléconduite.

Les phénomènes de défaillances en cascade font par ailleurs l'objet d'études et d'actions particulières pour les trois quarts des répondants, par le biais notamment d'études de vulnérabilités externes, de travaux de recherche, d'analyse fine de la dépendance au réseau électrique, de réunions en bilatéral avec d'autres opérateurs... Cependant, un quart des gestionnaires n'a aujourd'hui pas mis en place



d'actions relatives à la gestion de cette problématique. La Figure 120 indique finalement que les organisations auxquelles appartiennent les répondants à l'enquête accordent une importance particulière aux phénomènes de défaillances en cascade dans un contexte de crue, allant de « moyenne » à « forte ».

*Quelle importance pensez-vous que votre organisation accorde actuellement aux phénomènes de défaillances en cascade dans un contexte de crue ?*

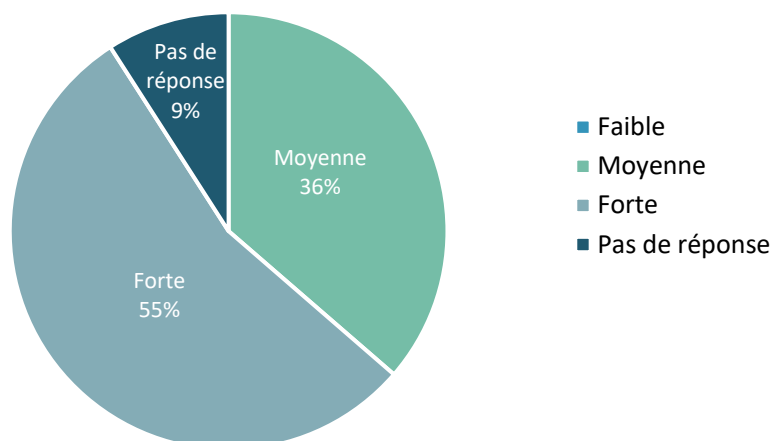


Figure 120 : L'importance accordée par les organisations des répondants aux phénomènes de défaillances en cascade dans un contexte de crue.

Nous pouvons ici conclure qu'une unification des niveaux de conscience du risque de survenue de défaillances en cascade, des impacts potentiels de celles-ci au sein des réseaux techniques urbains, mais aussi des concepts relatifs à cette problématique serait bénéfique à la prise en compte des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade.

### 8.3.2. Bilan des connaissances et des données disponibles concernant les vulnérabilités et (inter)dépendances au niveau des réseaux techniques urbains

Une certaine hétérogénéité entre les différents gestionnaires demeure aujourd'hui en termes d'évaluation, de prise en compte et de préparation concernant le risque de crue majeure, bien que tous les opérateurs considèrent actuellement avec sérieux cette problématique. La totalité des répondants à l'enquête a déjà identifié de façon formelle des infrastructures critiques au maintien de leur activité au niveau de leur propre réseau, certains en effectuant une priorisation et une classification de celles-ci. Ces infrastructures critiques sont prises en compte et considérées pour l'identification de leurs vulnérabilités, mais aussi pour la mise en place d'actions palliatives et de mesures préventives.

L'ensemble des répondants a également effectué un travail d'identification des infrastructures qui sont critiques à leur activité mais qui ne font pas partie de leur réseau. La question de la prise en compte des infrastructures critiques externes au réseau dans l'identification des vulnérabilités de chacun se pose ici. Les vulnérabilités en cas d'inondation sont déterminées à partir de différents paramètres concernant les infrastructures, présentés dans la Figure 121. Ce sont principalement la hauteur (c'est-à-dire l'altitude) et la position géographique de ces infrastructures qui sont utilisées, ce qui signifie que c'est l'exposition et non la vulnérabilité qui est ici identifiée. Des données plus poussées comme les temps d'autonomie ou les redondances existantes sont parfois utilisées pour identifier des vulnérabilités.

*Quels paramètres concernant vos infrastructures vous permettent d'identifier vos vulnérabilités en cas d'inondation?*

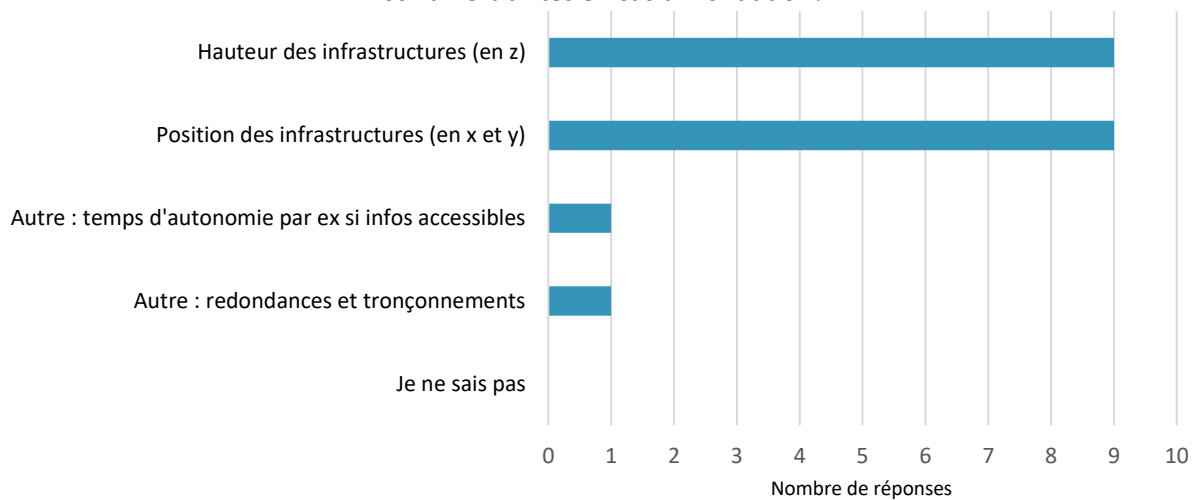


Figure 121 : Les paramètres pris en compte pour identifier les « vulnérabilités » des infrastructures en cas d'inondation.

L'ensemble des opérateurs est aujourd'hui conscient de l'exposition de ses installations et de leurs vulnérabilités, et généralement aussi des (inter)dépendances existantes en leur sein mais aussi avec d'autres réseaux. Les travaux de Toubin (2014) ont d'ailleurs aidé certains opérateurs à identifier et formaliser ces liens de dépendances. Ces dépendances, qu'elles soient entrantes ou sortantes, peuvent être identifiées par le biais de différents moyens comme présenté dans la Figure 122 :

- Des études structurelles des infrastructures, où les installations du réseau sont passées au crible et où chaque dépendance est identifiée par le personnel opérationnel.
- Des échanges avec les autres gestionnaires, pour l'identification de dépendances sortantes dont les opérateurs pourraient ne pas avoir conscience ou pour l'analyse plus fine de relations de dépendances connues.
- Des retours d'expérience réalisés à la suite d'événements ayant impacté leur réseau ou des réseaux similaires (ailleurs en France ou à l'étranger) pour l'identification de potentielles relations non répertoriées.
- Une expertise générale du réseau, lorsqu'un ou plusieurs experts possédant une connaissance générale du réseau déterminent les relations de dépendances à prendre en compte.

*Comment déterminez-vous les dépendances entrantes ou sortantes de votre réseau ?*

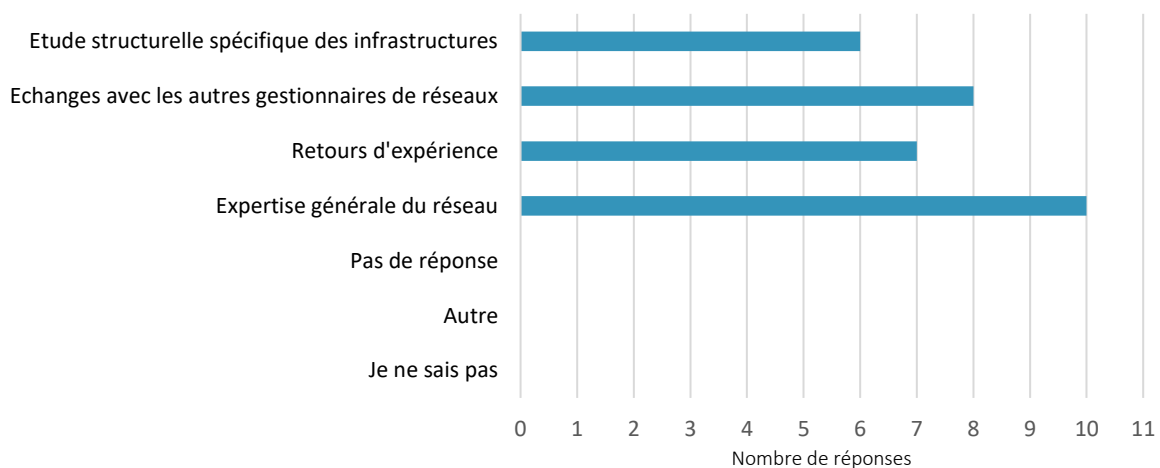


Figure 122 : Les moyens utilisés par les gestionnaires de réseaux pour déterminer les dépendances entrantes et sortantes de leur réseau.

Rappel de la typologie de dépendances :

(Inter)dépendance physique : L'état de l'infrastructure A dépend d'une sortie matérielle de l'infrastructure B (une pompe hydraulique est dépendante de son alimentation en électricité).

(Inter)dépendance cybernétique : L'état de l'infrastructure A dépend d'informations transmises par l'infrastructure B via un système d'informations (un feu de signalisation du réseau de métro est dépendant de ses commandes centralisées).

(Inter)dépendance géographique : L'état de l'infrastructure A dépend de l'état de l'infrastructure B par le biais de sa proximité géographique (un câble électrique enterré est dépendant de l'état de la chaussée qui le recouvre). A noter que ces dépendances ne sont pas fonctionnelles, mais dépendent strictement de relations physiques.

(Inter)dépendance logique ou sociale : L'état de l'infrastructure A dépend de celui de l'infrastructure B par l'intermédiaire d'autres procédés, relatifs notamment aux décisions humaines et aux organisations sociétales comme des réactions de panique, liens politiques, économiques ou financiers (le système de communication est dépendant d'une potentielle réaction de panique entraînant une surcharge de son réseau).

La Figure 123 souligne l'importance donnée aux dépendances physiques par les différents opérateurs de réseaux, en comparaison des dépendances logiques/sociales, cybernétiques et géographiques, ces dernières étant plus souvent considérées que les deux autres. Ce résultat résonne avec la proportion des actions menées sur les liens physiques, qui représentent la quasi-totalité des actions sur les dépendances. Les liens géographiques et cybernétiques (principalement pour la télégestion) font l'objet de quelques études, tandis que les dépendances logiques/sociales ne sont quasiment jamais considérées. Les répondants -en charge de la problématique au sein de leur organisation- estiment par ailleurs que les dépendances devraient être plus considérées et étudiées, quel que soit leur type.

*Quelle importance pensez-vous que votre organisation accorde actuellement aux différents types d'(inter)dépendances dans un contexte de crue ?*

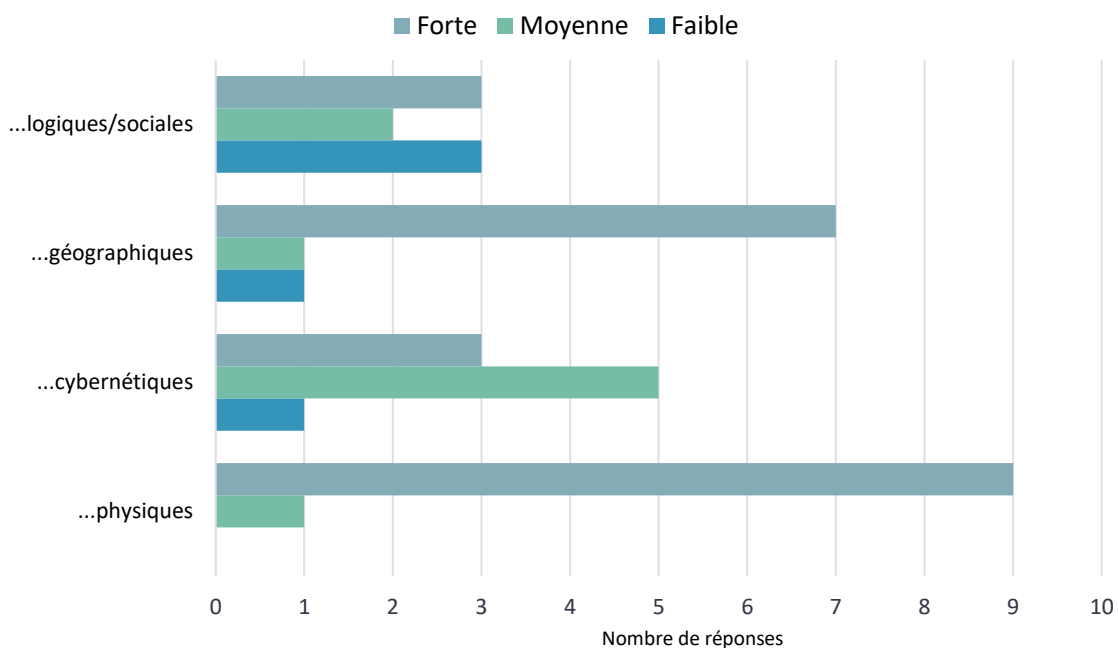


Figure 123 : L'importance accordée au différents types d'(inter)dépendances dans un contexte de crue.

Les liens de dépendance identifiés par les répondants à l'enquête sont présentés dans la Figure 124. En vert sont comptabilisés les gestionnaires se déclarant dépendants au réseau en ordonnée, tandis qu'en bleu sont comptabilisés les gestionnaires déclarant que le réseau en ordonnée est dépendant au leur. Les réseaux « donneurs » principaux sont sans surprise le réseau d'électricité et les télécommunications pour les questions plus liées au fonctionnement physique et structurel, tandis que ce sont les transports – ferré et routier – qui se révèlent critiques pour les questions liées à l'organisation et l'accessibilité. Les télécommunications sont considérées comme dépendantes d'un nombre conséquent d'autres réseaux, tels que l'électricité (alimentation), les autres réseaux de télécommunications (liens physiques et matériels), les réseaux de transports en commun (passage de gaines dans les emprises) et l'assainissement (refoulements et sites avec salariés).

### Avez-vous connaissance de réseaux...

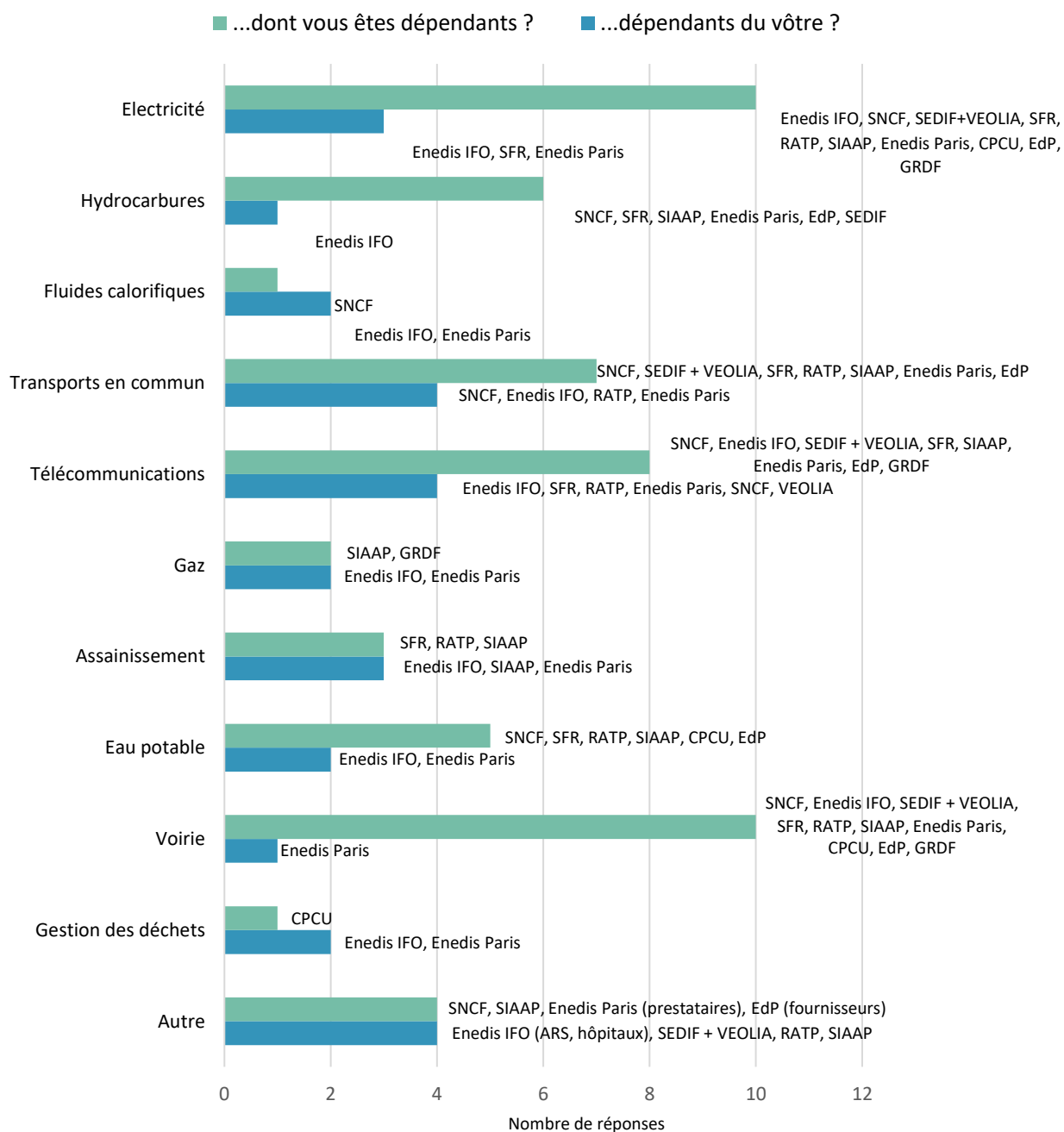


Figure 124 : Les dépendances entrantes et sortantes identifiées par les gestionnaires de réseaux.

### 8.3.3. Actions mises en place et outils utilisés

Plus de la moitié des répondants estime que des mesures prévues par le PPCI ont déjà mises en place pour améliorer l'autonomie du réseau par rapport à d'autres services ou d'autres ressources. La totalité des opérateurs ayant répondu ont déclaré que des moyens palliatifs étaient prévus en cas de dysfonctionnement interne au sein de leur réseau. Par ailleurs, l'enquête a permis de souligner que les personnes en charge du dossier inondation n'étaient souvent pas en charge de l'activité opérationnelle, et étaient plutôt considérés comme des experts de leurs sujets (que ce soit le risque inondation, les risques externes en général, la continuité d'activité...). Les répondants ne sont donc pas les utilisateurs des outils de gestion quotidienne, de planification ou de gestion de crise, et n'en sont pas des spécialistes. Une corrélation avec l'ancienneté de la personne au poste occupé peut aussi être faite dans certains cas. Il ressort de l'enquête que de très nombreux outils sont utilisés par les opérateurs de réseaux urbains. Ces outils sont plus ou moins formalisés (modélisations physiques complètes, cartographie SIG dynamique, tableurs Excel récapitulatifs des installations exposées...), plus ou moins informatisés (simulations dynamiques des flux, traitements de type Big Data...) et permettent une gestion plus ou moins en temps réel (capteurs, télégestion, ou basés sur les plans...). Dans la majorité des cas, les outils habituels de la gestion quotidienne diffèrent des outils de planification et de gestion de crise pour le risque inondation. Ce qui pose la question de la mise à jour et de la maîtrise de ces outils plus occasionnels et plus informels, nécessitant une expertise particulière. L'expertise joue en effet un rôle important sur ces questions de gestion du risque inondation. Une brève revue des outils utilisés par les répondants est proposée ci-dessous.

Veolia a conçu pour le SEDIF un outil de pilotage centralisé de l'ensemble du réseau d'eau appelé ServO inauguré en 2016 (<https://www.sedif.com/centre-de-pilotage-ServO.aspx>). Cet outil met en relation l'ensemble des données d'exploitation du réseau, pour la supervision et l'optimisation de sa gestion mais aussi pour la gestion des situations de crise. Il est accessible 7 jours sur 7, 24h sur 24, aux équipes du SEDIF et du VEDIF (la branche de Veolia dédiée à la gestion de ce réseau). ServO est interopérable avec tous les autres composants du système d'information et traite des données hétérogènes pouvant provenir par exemple des systèmes informatiques industriels des usines, de l'instrumentation du réseau, des relevés des compteurs, des prévisions météorologiques. Les résultats des analyses et notamment des indicateurs calculés sont représentés sous forme de tableaux, courbes, cartes ou modèles 3D.

Le SIAAP utilise quant à lui l'outil MAGES (Modèle d'Aide à la Gestion des Effluents du SIAAP), qui régule 7 jours sur 7 et 24h sur 24 le réseau d'assainissement. Il recueille les informations des acteurs de l'assainissement (communes, syndicats de communes et conseils généraux) et des capteurs en télégestion, en intégrant également les infos de Météo France. MAGES analyse ces informations et propose des scénarios adaptés au cas par cas, avec des éléments d'aide à la décision pour les exploitants des infrastructures. Chaque usine possède également son propre outil de gestion spécifique à son fonctionnement. L'outil MAGES a été créé pour une gestion quotidienne, même s'il peut être utilisé pour de l'aide à la décision et de la surveillance du réseau en temps réel lors d'une crise. Des données techniques concrètes sur les infiltrations, les fuites, les débordements, les eaux d'exhaure, les remontées de nappe seraient cependant nécessaires ce type d'utilisation.

Un autre exemple est l'outil VIGEO+ développé par ENEDIS (à l'époque ERDF) depuis 2014, suite au constat du besoin d'informations en temps réel au sein des cellules de crise (préfecturales notamment). L'objectif est alors de fluidifier les échanges d'informations pendant une situation de crise, en interne mais aussi en externe. Cet outil permet d'identifier les clients impactés par des pannes, les postes de distribution publics et les postes clients coupés en temps réel. Une déclinaison

locale de l'outil pour la Ville de Paris – « la Parisienne » - a été créée. L'outil permet alors d'identifier les zones et infrastructures à surveiller / couper / isoler / rebrancher / ou pour lesquelles il faut envoyer une équipe.

Concernant le réseau de gaz, GRDF ajoute seulement des emprises de crue dans l'outil de simulation du réseau utilisé pour déterminer l'exposition des installations et les mesures à prendre. Il permet d'identifier et visualiser la situation au sein du réseau et les clients impacts selon les manœuvres opérées. D'autres opérateurs n'utilisent pas un outil unique central mais plusieurs outils selon les utilisateurs ou selon les utilisations. La RATP utilise ainsi de nombreux logiciels métiers qui diffèrent selon les directions, les services et les cellules. Une modélisation 2D du réseau, des infiltrations et des flux hydrauliques a été réalisée grâce au logiciel Mike Urban. Pour l'instant ses résultats ont permis la construction de cartes chronologiques statiques permettant la visualisation des lignes impactées par la crue. La CPCU utilise quant à elle différents outils pour la conduite du réseau, la télésurveillance et la cartographie. Un outil appelé NEMO permet la modélisation dynamique du réseau et peut potentiellement être utilisé en temps de crise, en utilisation des données de flux et d'engagement des moyens de production. La SNCF utilise entre autres un outil SIG appelé GEOPRISM dans lequel figurent les couches des scénarios d'inondation créées par la DRIEE et grâce auxquelles ils peuvent déterminer les installations impactées. L'outil permet d'identifier les zones inondées, les zones vulnérables et les seuils pour le lancement des actions prévues par le PCA. Une plateforme de partage de documents pour la planification (PCA, scénarios, etc.) est également disponible, et des modélisations hydrauliques par installation sont en cours d'élaboration.

La Figure 125 montre qu'un quart des répondants déclare que certaines informations entrantes de leurs outils métiers se rapportent à d'autres réseaux, tandis qu'un quart ne peut répondre à la question. On peut ici citer l'exemple du SIAAP dont l'outil nécessite des cartes plus précises que celles partagées sur la plateforme Alfresco pour les vulnérabilités électriques, et qui échange dans ce sens avec l'opérateur. Enedis a également besoin des vulnérabilités des télécommunications pour définir les évolutions du fonctionnement de ses installations et échange donc avec les opérateurs pour obtenir ces informations. Cela souligne l'importance des échanges d'informations pour la conduite du réseau et la continuité d'activité, que ce soit au niveau des services d'un même opérateur ou entre plusieurs opérateurs. Ces observations donnent finalement des éléments concernant la faisabilité d'une éventuelle approche fédératrice, qui rassemblerait des outils sectoriels déjà en place.

*Est-ce que certaines informations entrantes de vos outils de gestion du réseau sont des informations se rapportant à d'autres réseaux techniques (potentiellement obtenues par leurs propres outils métier) ?*

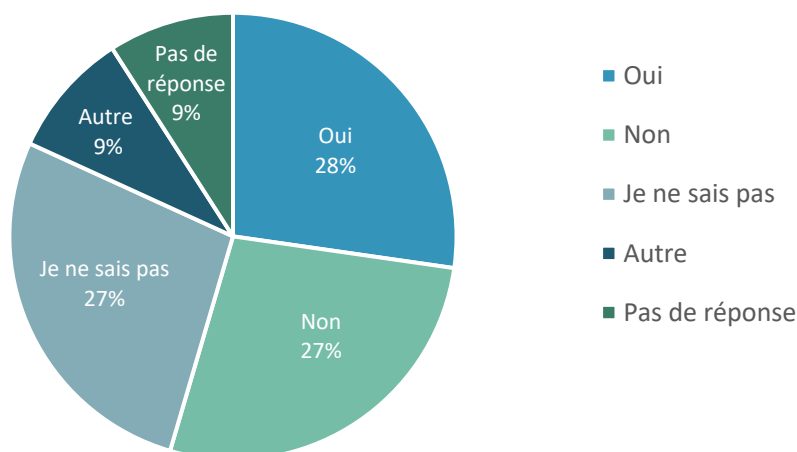


Figure 125 : L'origine des informations entrantes des outils de gestion des réseaux.

La question des incertitudes demeure une problématique majeure lors de la gestion d'un événement où l'aléa est incertain, car les impacts directs et indirects de celui-ci mais aussi les réponses et mesures prises face à ceux-ci conservent une part non négligeable d'imprécision ou d'incomplétude. L'enquête permet de souligner avec la Figure 126 l'importance que les répondants accordent aux imprécisions relatives à l'estimation des vulnérabilités de leurs infrastructures, mais aussi à l'estimation des ressources disponibles et concernant l'aléa et son évolution.

Les imprécisions relatives aux dépendances et aux délais sont en général moins prises en compte. Il semble que ces incertitudes, qui peuvent être dues au caractère aléatoire du phénomène ou à un manque de connaissances, ne sont pas souvent considérées de manière formelle mais plutôt sous la forme de marges plus ou moins intuitives (par exemple le temps d'installation d'un groupe électrogène est estimé à X heures pour cette zone).

*Prenez-vous en compte les imprécisions suivantes dans la gestion d'une situation de crise ?*

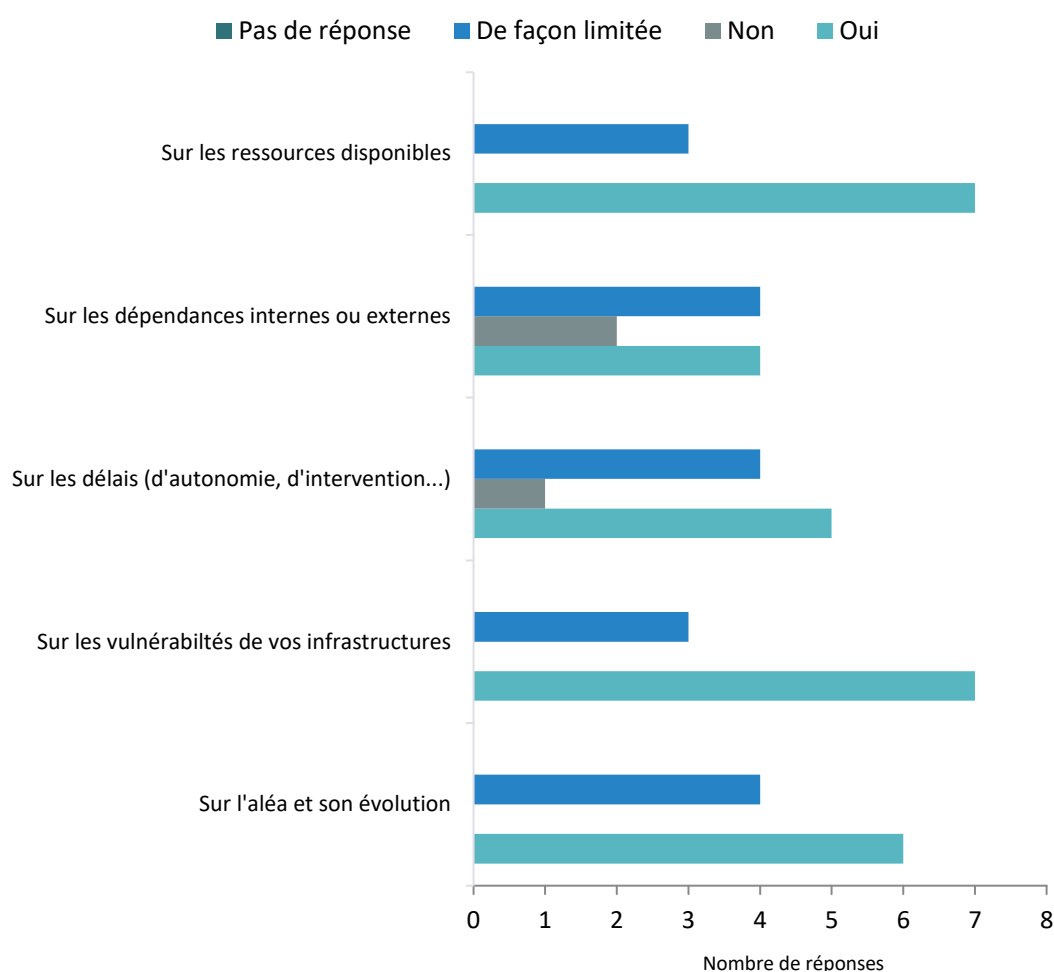


Figure 126 : Prise en compte des imprécisions dans la gestion d'une situation de crise.

### 8.3.3. Echanges d'informations

La question des flux d'informations et des données échangées entre les acteurs sur le sujet de la crue devient centrale lorsqu'on étudie la problématique des (inter)dépendances et des défaillances en cascade. L'objectif est alors de diagnostiquer l'importance de ces échanges, ainsi que la nature et la direction des flux.

On présente à la Figure 127 une schématisation des flux d'informations dont les répondants étaient dépendants et qui ont effectivement été reçus lors des derniers événements de crue. Les liens sont directionnels, le bout de la flèche représentant le répondant recevant l'information. On observe l'importance des services de l'Etat et surtout de la Zone de Défense et de Sécurité, des services de prévisions météorologique et hydrologique, mais aussi des collectivités locales dans une moindre mesure pour le suivi de la situation. On remarque par ailleurs l'absence de flux d'informations nécessaires avec les usagers / clients ainsi qu'avec les services de la sécurité civile. Les échanges entre les opérateurs suite à l'expression d'un besoin sont relativement peu nombreux, et proviennent seulement des opérateurs de télécommunications et de distribution d'électricité interrogés.

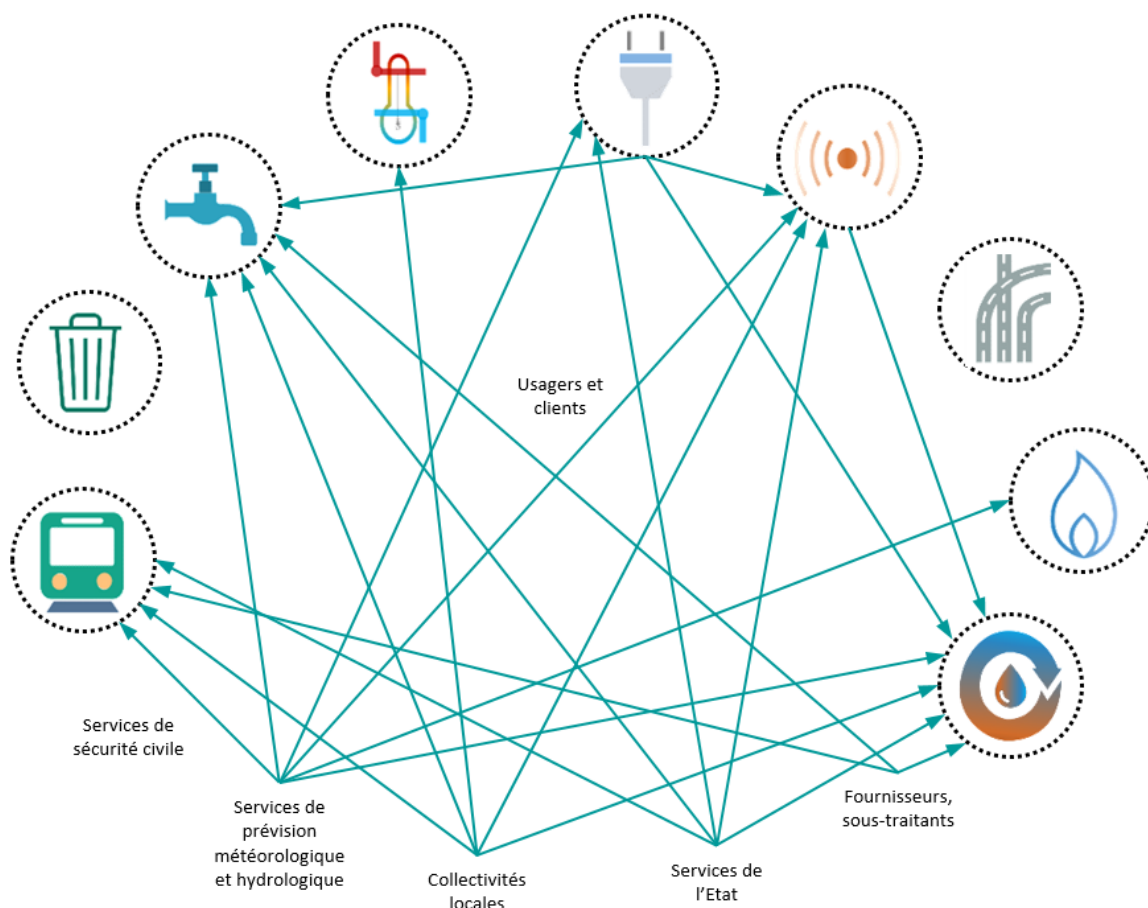


Figure 127 : Les échanges d'informations répertoriés dont les opérateurs interrogés étaient dépendants lors des épisodes de crue de 2016 et 2018.

Les prévisions et les relevés de montées des eaux de Vigicrue, plateforme en ligne où chaque tronçon des cours d'eau surveillés est affecté à un niveau de vigilance nécessaire dans les prochaines heures ou prochains jours pour faire face aux éventuels dangers ("Vigicrues : Carte de vigilance crues nationale," <https://www.vigicrues.gouv.fr/>), sont des informations critiques pour tous les opérateurs, ainsi que les relevés piézométriques de l'IGC (Inspection Générale des Carrières). L'estimation des vulnérabilités et impacts à prévoir, notamment pour l'alimentation en électricité est également un sujet majeur.

Les réponses soulignent un manque d'informations et de visibilité concernant les vulnérabilités des services de télécommunications, ce qui devrait peut-être évoluer avec le partage de cartes lissées pour les trois opérateurs. Certains opérateurs sont conscients de pas connaître toutes leurs vulnérabilités



externes (notamment liées aux dépendances avec d'autres réseaux). Les répondants partagent le sentiment d'un manque d'informations concernant les phénomènes de remontées de nappes, et la question des délais d'annonce concernant la montée des eaux est également évoquée par plusieurs répondants, ainsi que le relatif manque de préparation pour la phase de décrue.

Les échanges lors d'une crue se font généralement par le biais des réunions au Centre Opérationnel de Zone de la Zone de Défense ou à la Ville de Paris, mais aussi par e-mail. Les données hydrologiques sont récupérées à partir du site internet vigicrue.fr ou de cartes piézométriques .pdf partagées de façon ponctuelle. On note que peu d'échanges bilatéraux sont engagés sur des questions spécifiques. Les communications sur Crisorsec, application numérique sous forme de main courante pour les échanges d'informations en temps réel entre les parties prenantes lors d'une crise, semblent parfois ardues mais le concept d'un outil de partage commun est apprécié.

La Figure 128 présente les acteurs à qui les répondants de l'enquête doivent rendre compte de leur situation et de leurs actions. Ce sont logiquement les services de l'Etat, les collectivités et les services internes à l'organisation qui exigent des points de situation, et qui en reçoivent conformément à leur demande.

*Pendant un épisode de crue, à quels acteurs identifiés ci-dessous...*

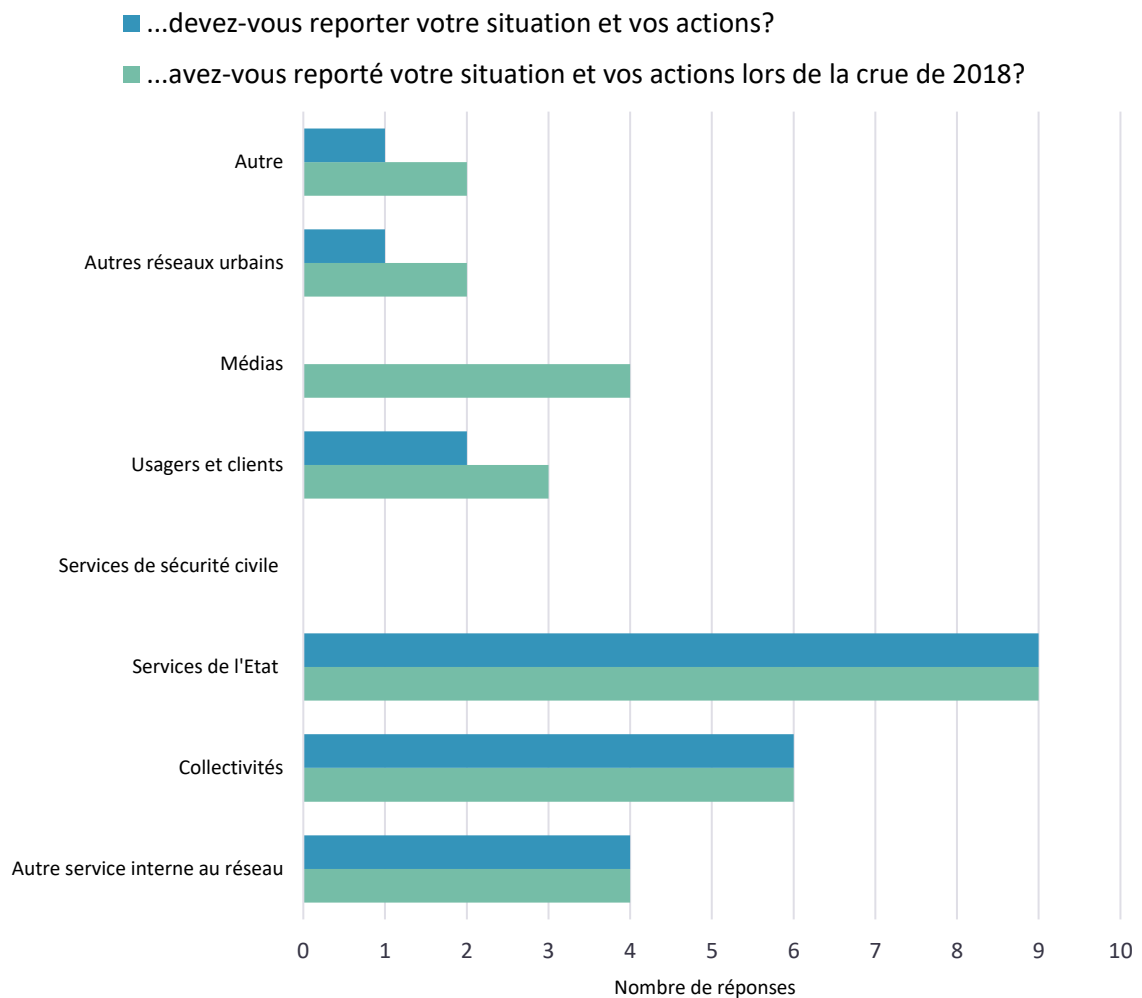


Figure 128 : Les acteurs auxquels les répondants doivent reporter leur situation et leurs actions.

La revue des flux d'informations, et la comparaison des flux potentiels et des flux réels constatés lors des derniers événements, nous amène à proposer plusieurs observations :

- Les services de sécurité civile ne prennent pas part aux échanges d'informations au sujet de la situation lors d'une crue, que ce soit en tant qu'émetteur ou destinataire de l'information.
- Les usagers et clients sont très peu impliqués dans la remontée d'informations concernant l'état des services.
- Les échanges entre opérateurs sont très limités, se résumant pour la plupart à une réception d'informations provenant des gestionnaires du réseau électrique.
- Les opérateurs de réseaux reportent principalement à leurs directions, aux services de l'Etat, et dans une moindre mesure aux collectivités locales auxquelles ils procurent leurs services.

Finalement, on observe que les échanges d'informations se font en majorité en interne entre les différents services des opérateurs, ou avec les services de l'Etat. Les échanges entre opérateurs sont assez limités, et les informations transitent donc principalement par les cellules de crises collectives et réunions organisées par la Zone de Défense et de Sécurité et la Ville de Paris. Ce qui pose la question de l'intérêt potentiel d'échanges plus informels sans la présence des services tels que la Zone de Défense, afin que les opérateurs puissent échanger plus librement, remettre en question les propos des autres, et discuter de certains points sensibles ayant attiré à des vulnérabilités ou des incertitudes par exemple.

#### 8.3.4. Les initiatives passées et actuelles

Après le diagnostic de la vulnérabilité de la métropole face à la crue (Reghezza, 2006) et des impacts que celle-ci engendrerait, divers travaux de recherche se sont intéressés à la résilience des réseaux (inter)dépendants sur le terrain de l'agglomération parisienne. C'est à partir du début des années 2010 que les gestionnaires ont réellement commencé à considérer la problématique des réseaux techniques interdépendants.

##### 8.3.4.1. Analyse bottom-up des (inter)dépendances des services urbains parisiens

Des travaux en partenariat avec Egis et appuyés par la Ville de Paris ont permis il y a quelques années une première analyse globale « directe » des (inter)dépendances des services urbains et de leurs infrastructures afin d'étudier les conditions du fonctionnement de ces services (Toubin et al., 2014). Le formalisme utilisé s'inspire des travaux menés au Québec sur le sujet (Benoit Robert, 2004).

Cette analyse a été complétée par une analyse spatialisée des (inter)dépendances et des stratégies de réponse face à un scénario d'inondation centennale sur les XIIème et XIIIème arrondissements, grâce à des ateliers collaboratifs avec les gestionnaires concernés.

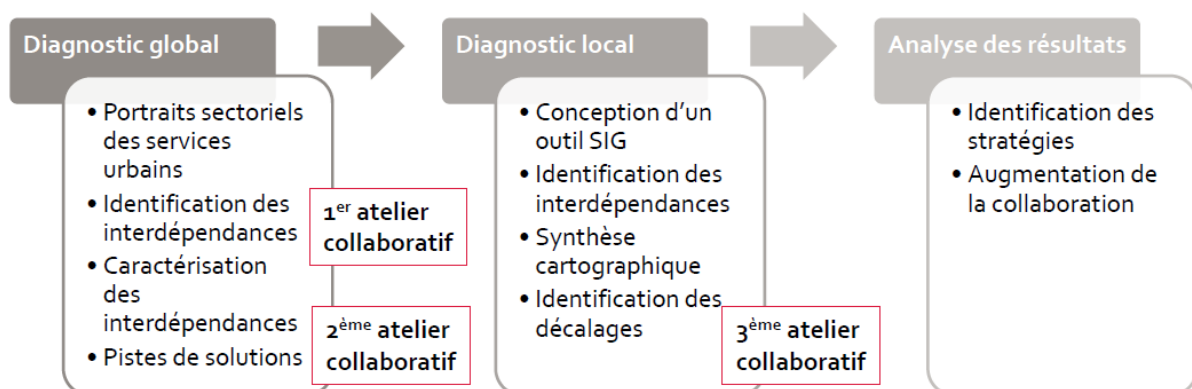


Figure 129 : Etapes de la démarche menée auprès des gestionnaires de services parisiens. Source : (Toubin, 2014).

La démarche reposait en premier lieu sur une analyse qualitative au niveau du territoire parisien et de l'ensemble des services urbains, puis sur une analyse semi-quantitative au niveau d'un territoire réduit et considérant un nombre restreint d'infrastructures et d'enjeux, et ce pour un scénario d'aléa unique.

Tableau 44 : Analyse de l'approche développée par (Toubin, 2014).

|                                    |   |   |
|------------------------------------|---|---|
| Etapes méthodologiques             | Identification des (inter) dépendances ; formalisation des (inter) dépendances, modélisation relations d'(inter) dépendances sous forme de base de données relationnelle.   |   |
| Approche correspondante            | Approche holistique, ascendante et empirique.   |   |
| Systèmes considérés et granularité | Les systèmes considérés étaient dans un premier temps l'ensemble des réseaux techniques parisiens, avec une granularité macroscopique au niveau des entités « réseaux ».  | L'approche s'est focalisée sur deux arrondissements parisiens dans un deuxième temps, avec une importante sélection d'infrastructures et d'enjeux (cf. Figure 131). |
| Données nécessaires                | Les données utilisées étaient tout d'abord des données en libre accès sur les relations fonctionnelles entre les réseaux. La récolte de données supplémentaires s'est faite grâce à des entretiens individuels et des ateliers collaboratifs.   |   |
| Résultats obtenus                  | Cartographie fonctionnelle des réseaux parisiens et de leurs relations de dépendances macroscopiques. Hiérarchie générique des liens de dépendance entre les réseaux parisiens selon des critères de criticité et d'autonomie (cf. Figure 130). | Cartographie évolutive des impacts prévus pour chaque étape d'un scénario de crue type 1910 sur deux arrondissements.   |
| Conditions de mise en œuvre        | Mise en œuvre portée par le Pôle de Gestion de Crise de la Mairie de Paris, qui a appuyé l'organisation d'ateliers collaboratifs avec les gestionnaires de réseaux techniques parisiens. Le travail s'est étalé sur environ deux ans.           |   |

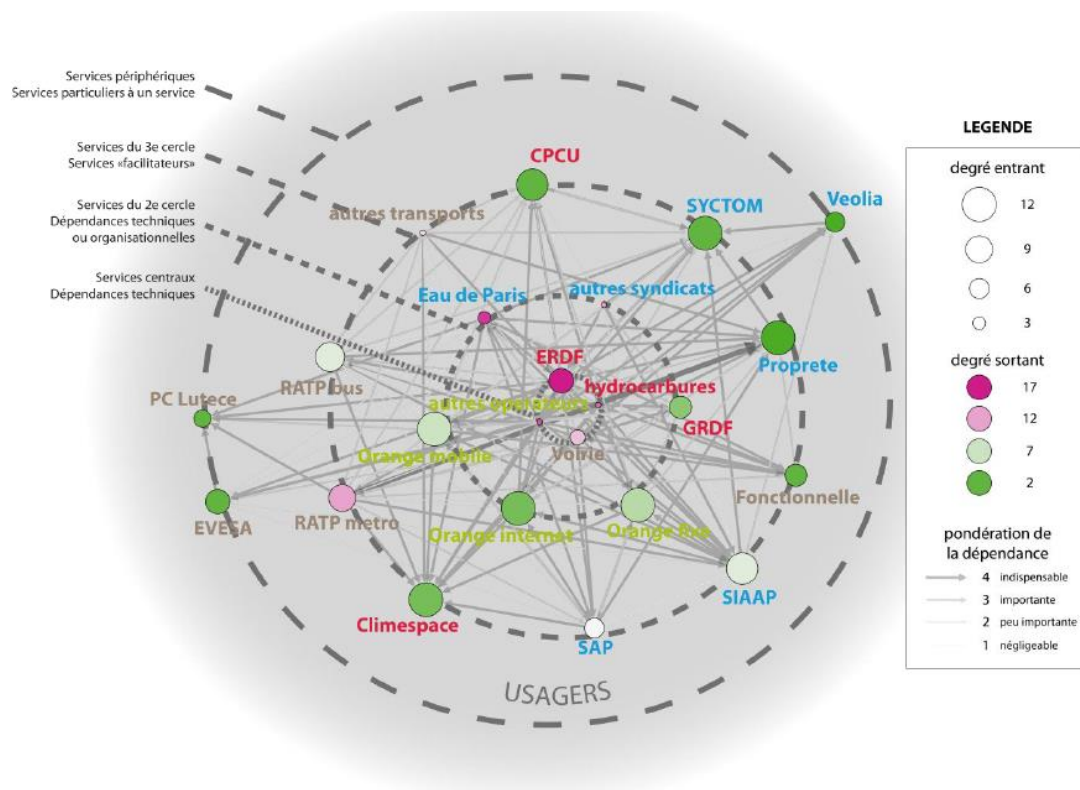


Figure 130 : Hiérarchie générique des services urbains parisiens vus par les gestionnaires. Source : (Toubin et al., 2013).

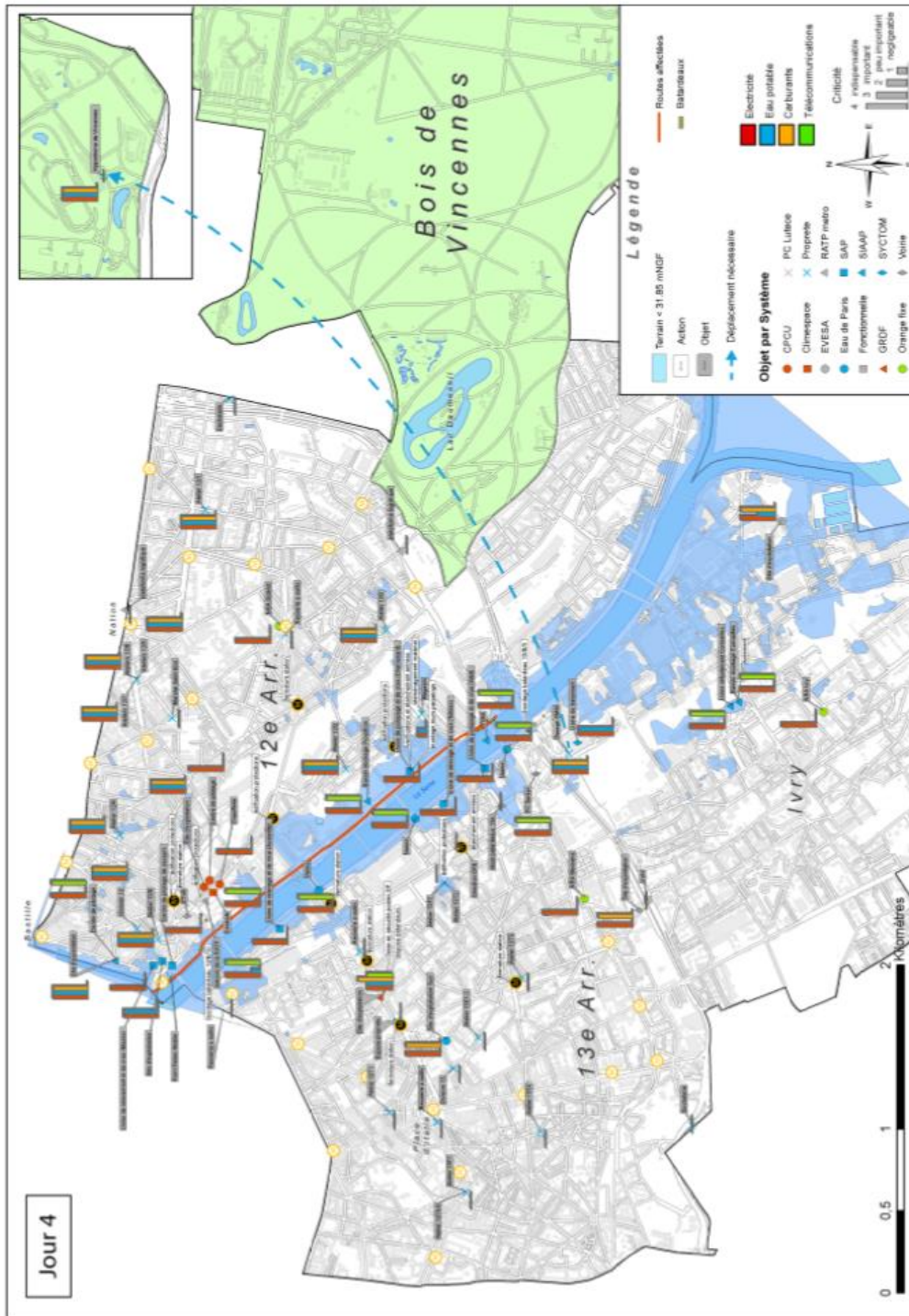


Figure 131 : Identification et localisation des impacts de l'inondation pour une hauteur d'eau de 31,85m NGF au 4<sup>ème</sup> jour.  
Source : (Toubin, 2014).

Ces travaux font ainsi écho à la difficulté de combiner à la fois une zone géographique étendue, une diversité des infrastructures considérées, et une granularité fine. Le manque de données, le temps de traitement très conséquent, et les incertitudes relatives à ce scénario et ses impacts font partie des phénomènes à l'origine de cette difficulté. Les résultats de ces travaux nous amènent à considérer que la modélisation fine des liens d'(inter)dépendances pour l'ensemble des réseaux franciliens et de leurs conséquences en termes d'impacts face à différents scénarios de crue majeure semble difficilement envisageable dans les conditions actuelles. Il en ressort la nécessité de se restreindre à des échelles spatiales/temporelles ou des degrés de complexité limités. Ainsi, nous nous intéressons par la suite à

d'autres moyens d'identification et d'analyse de ces phénomènes, s'appuyant sur les actions en cours au niveau de la région francilienne et passant notamment par la cartographie.

#### 8.3.4.2. Une cartographie temporelle combinée des dysfonctionnements prévus par les gestionnaires de la petite couronne

D'autres travaux de recherche plus récents, dans le cadre du programme Euridice et en partenariat avec le SGZDS, ont étudié la gestion des risques, crises et événements majeurs. Ces recherches se sont notamment intéressées aux grands événements sportifs, à l'exercice de gestion de crise EU Sequana, et à la crue de mai-juin 2016. Le sujet des (inter)dépendances entre les acteurs a été abordé dans un sous-projet particulier en partenariat avec le SGZDS, la DRIEE et la société Deltares, qui s'appuyait sur l'utilisation du logiciel Circle développé par cette dernière (Deltares, 2018). CIRCLE (Critical Infrastructures: Relations and Consequences for Life and Environment) est un outil numérique collaboratif (illustré dans l'état de l'art de la partie II), et son application visait à capitaliser et entretenir les connaissances acquises au cours de l'exercice EU Sequana et à proposer une cartographie, la plus complète possible, permettant de visualiser les liens de dépendances dans un contexte de crue majeure de la Seine et de ses affluents.

Après avoir rencontré les opérateurs individuellement en entretien, des ateliers collectifs ont été organisés pour expérimenter CIRCLE, avec une entrée thématique liée à la question de l'énergie et du transport, et une entrée thématique liée à un territoire, à savoir le département des Hauts-de-Seine. Ces travaux ont permis la création d'une cartographie combinée des plans de continuité d'activité des gestionnaires d'infrastructures critiques et de services (Gueben-Venièrre, 2017).

Un prototype de carte – crée en collaboration avec l'Institut de l'Information Géographique et forestière – et affichant non plus des hauteurs d'eau mais des temps avant dysfonctionnement, est présenté dans la Figure 132 (Gueben-Venièrre, 2019). Ces estimations temporelles sont fondées sur les plans de continuité d'activité, les cartographies de vulnérabilité et sur la cinétique du scénario de crue utilisé lors de l'exercice EU Sequana.

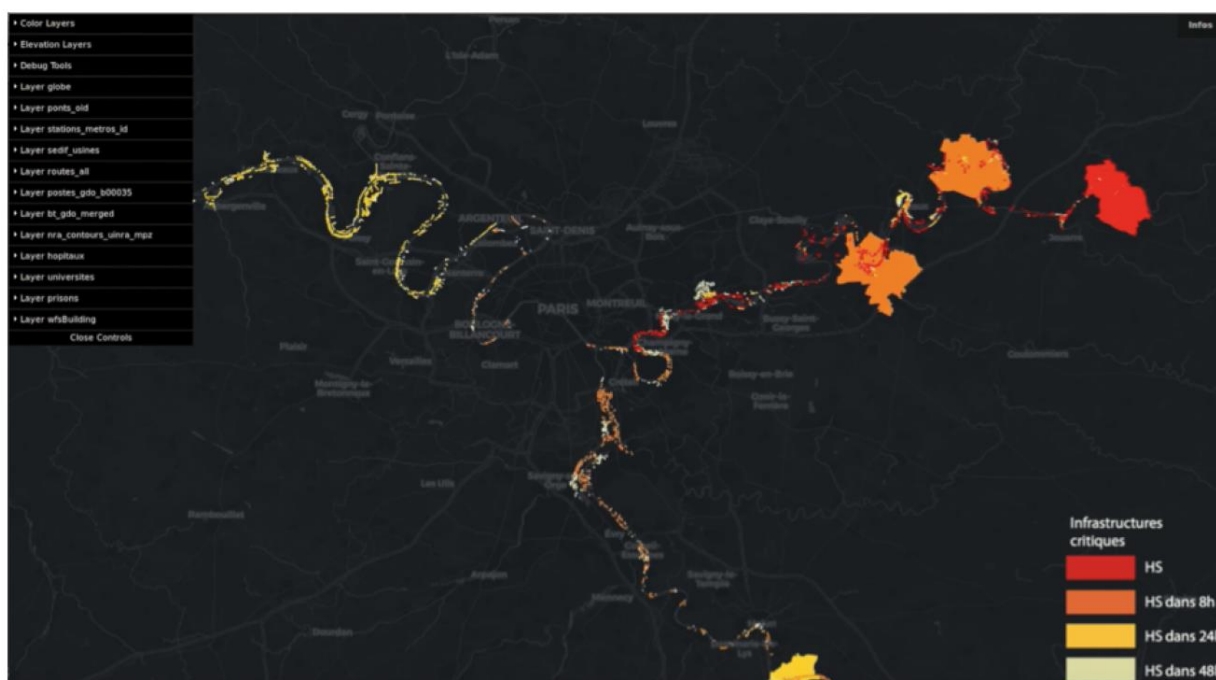


Figure 132 : Capture d'écran du prototype de cartographie en ligne, fondé sur l'évolution temporelle des dysfonctionnements. Source : (Gueben-Venièrre, 2019).

Tableau 45 : Analyse de l'approche développée par (Gueben-Veniere, 2019).

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| Etapes méthodologiques             | Le travail d'identification, de formalisation et de modélisation est réalisé par les opérateurs, qui partagent ensuite des zonages de « vulnérabilité » selon les scénarios et la temporalité choisis. La plupart ne prennent pas en compte leurs dépendances à d'autres réseaux, à part l'électricité par exemple.  |
| Approche correspondante            | Approche ascendante – fédératrice informelle (couplage faible de résultats sectoriels).  |
| Systèmes considérés et granularité | Les systèmes considérés sont les réseaux franciliens gérés par les participants aux ateliers CIRCLE (Véolia Eau IDF, RATP, SEDIF, Orange, Eau de Paris, Enedis, SNCF, DRIEA).  |
| Données nécessaires                | Les données nécessaires sont la temporalité du scénario de crue étudié, les actions et mesures (notamment coupures) prévues par les opérateurs dans leurs plans, les zonages de « vulnérabilité » construites par les opérateurs.  |
| Résultats obtenus                  | Ces travaux ont permis la création d'un prototype de cartographie combinée à des plans de continuité d'activité des gestionnaires participants. Cette carte affiche non plus des hauteurs d'eau mais des temps avant dysfonctionnement, en se basant sur les plans de continuité d'activité, les cartographies de vulnérabilité et sur la cinétique du scénario de crue utilisé lors de l'exercice EU Sequana. |
| Conditions de mise en œuvre        | Entretiens individuels avec les opérateurs pour préparer l'intégration des données dans l'outil CIRCLE. Organisation d'ateliers collaboratifs par la Zone de Défense et de Sécurité avec une entrée sectorielle, et une entrée territoriale. Allers-retours pour la formalisation sous forme cartographique et l'envoi de compléments de données par la suite.   |

Ces travaux – qui vont vraisemblablement demeurer à ce stade de prototype - démontrent la faisabilité d'une approche par couplage de cartographies, mais aussi le besoin de rigueur et de cadre dans la construction de la méthodologie. En effet, le besoin de lister toutes les relations de dépendances en amont de ce type d'approches a été soulevé lors des ateliers ainsi que la nécessité de rassembler tous les opérateurs pour garantir une certaine exhaustivité. A ce stade, cette initiative a permis de représenter sous forme cartographique les prévisions de défaillances prévues dans les plans des différents opérateurs selon la cinétique d'un scénario de crue, mais n'a pas permis l'amélioration de l'identification et de la modélisation des (inter)dépendances à proprement parler.

#### 8.3.4.3. Les outils et approches des opérateurs

En temps normal, il existe plusieurs initiatives collectives qui rassemblent des opérateurs. Aux actions institutionnelles déjà présentées auxquelles prennent part les opérateurs s'ajoutent quelques actions bilatérales ou collectives entre les opérateurs, comme le Club de Continuité d'Activité qui rassemble plus de 150 professionnels autour de la continuité d'activité et de la gestion de crise (<https://www.clubpca.eu/>).

Les relations bilatérales peuvent s'organiser autour d'un point technique particulier qui apparaît critique ou problématique. Par exemple la SNCF et la RATP travaillent conjointement sur le sujet des connexions physiques entre leurs réseaux au niveau de certaines gares. Les relations peuvent s'organiser également autour d'échanges d'informations. Par exemple, certains opérateurs partagent des informations sur la localisation précise de leurs infrastructures pour obtenir d'Enedis les vulnérabilités électriques de celles-ci. Les opérateurs échangent également dans le cadre d'exercices, d'ateliers et de groupes de travail thématiques déjà présentés, qui sont autant d'occasions de lancer

des études sur un point particulier ou des échanges réguliers entre acteurs. A ce jour, aucune collaboration visant la connexion d'outils sectoriels ou la construction d'un outil commun de la part d'opérateurs de réseaux n'a été lancée.

#### 8.3.4.4. Les cartographies de vulnérabilités

La signature de la déclaration d'intention a permis l'instauration d'une initiative de partage d'informations concernant les vulnérabilités des opérateurs de réseaux signataires. Des cartographies de vulnérabilité sont générées par chaque opérateur et correspondent aux prévisions de vulnérabilité de son réseau et de ses infrastructures face aux différents scénarios de crue construits par la DRIEE. Ces cartographies sont destinées à être partagées dans une plateforme d'échanges commune entre les signataires de la déclaration d'intention, hébergée par la solution logicielle Alfresco.

Cette plateforme permet l'échange de données principalement sous la forme de cartographies et d'informations géographiques. Les services de l'Etat, notamment la DRIEE, la DRIEA, et la Zone de Défense et de Sécurité de Paris, y partagent des informations concernant le territoire (caractéristiques physiques, scénarios de crue, enjeux présents) tandis que les opérateurs de réseaux y partagent les vulnérabilités de leurs réseaux identifiées pour les différents scénarios de crue (cf. Figure 133).

Un diagnostic de la situation actuelle est ici présenté, se basant sur les informations récoltées auprès des participants à la plateforme et auprès des opérateurs par le biais de l'enquête. Nous précisons ici que les cartes analysées sont confidentielles, et que les discussions présentées ci-dessous ne divulguent donc pas leur contenu. Des propositions sont ensuite faites sur la base des observations réalisées, afin d'améliorer le potentiel de l'usage de ces cartographies.

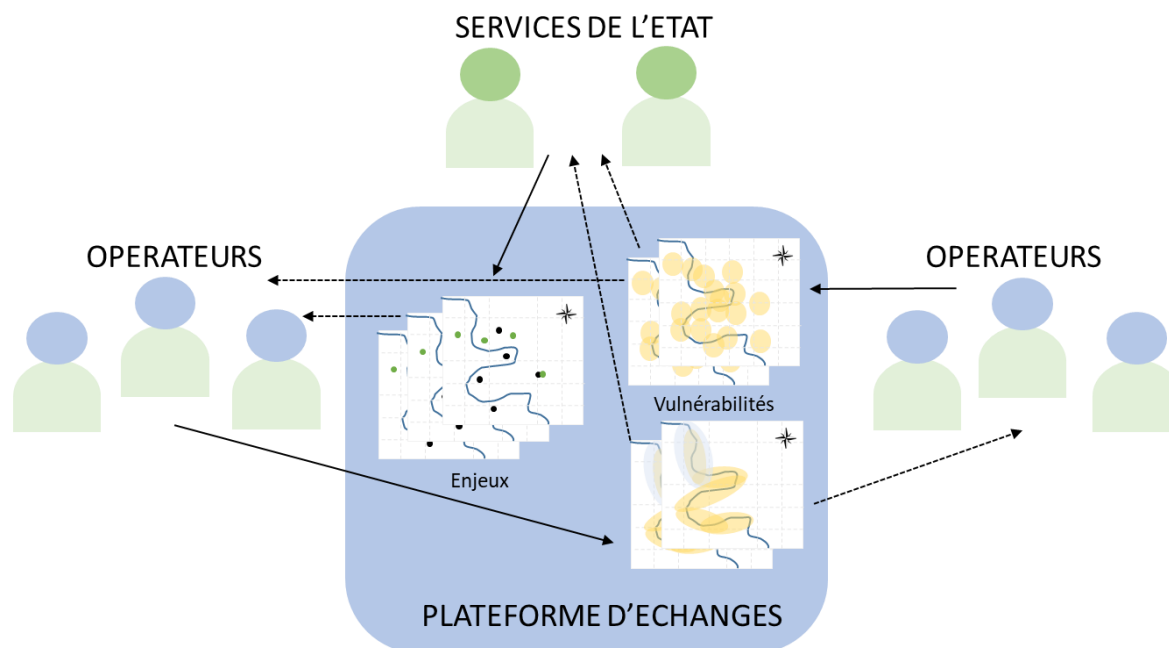


Figure 133 : Fonctionnement de la plateforme d'échanges d'informations concernant la crue.

La totalité des participants à l'enquête auprès des opérateurs est signataire de la déclaration d'intention mais les modalités de partage d'informations vers la plateforme collaborative ne sont pas encore unifiées, comme illustré dans la Figure 134. Certains opérateurs ne partageaient pas leurs zones de la vulnérabilité au moment de la conduite de cette enquête. Il faut ici préciser que les cartes partagées correspondent parfois à un scénario DRIEE, à plusieurs, voire à d'autres scénarios de crue (basés notamment sur d'autres hauteurs d'eau).

*Si vous êtes signataire, avez-vous partagé vos zones de vulnérabilité dans le cadre de cette initiative ?*

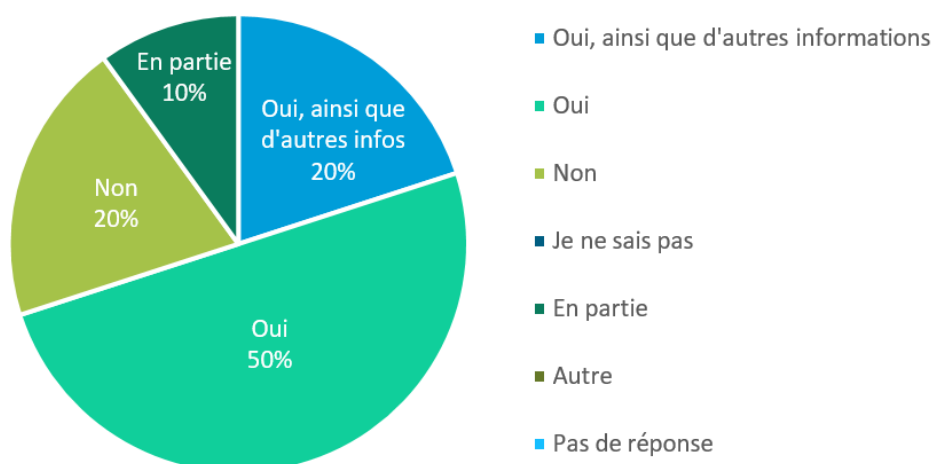


Figure 134 : Modalités de partage des cartographies de vulnérabilité vers la plateforme commune.

Il semble que cette plateforme est aujourd'hui principalement utilisée comme dépôt d'informations concernant les impacts potentiels d'une crue et comme preuve de la bonne volonté des opérateurs signataires, et non comme un outil collaboratif pour l'amélioration de l'identification et de la prévision des potentielles défaillances en cascade.

#### 8.3.4.5. Autres initiatives

La question de la gestion du risque inondation dans le contexte particulier qu'est la métropole parisienne a fait l'objet de différents travaux (Beucher & Reghezza-Zitt, 2008; Reghezza-Zitt, 2015), qui soulignent entre autres la faible prise en compte des interactions entre le risque et la spécificité de l'espace urbain, et l'extrême complexité de ce territoire au sein duquel les dynamiques métropolitaines viennent s'ajouter aux dynamiques urbaines classiques. Des travaux de recherche portent également sur une problématique plus restreinte ou un réseau particulier, comme le réseau d'assainissement (Moatty & Reghezza-Zitt, 2018). La vulnérabilité aux inondations du système d'assainissement est en effet particulièrement critique, et ce réseau est susceptible de créer « une crise dans la crise » bien qu'il ne soit pas autant étudié que d'autres réseaux.

Un projet de cartographie a également eu pour objectif de proposer un service numérique de gestion et communication de crise avec la plateforme cartographique CAIAC (Centre d'Analyse des Interdépendances et d'Assistance à la Continuité d'activité). Développée par le Haut Comité Français pour la Défense Civile (HCFDC, désormais Résilience France), elle a pour ambition la contextualisation rapide d'un territoire pour des actions de prévention, d'analyse ou de gestion de situation de crise. Cet outil dispose de plus de 400 couches d'informations et d'enjeux sur les territoires dont 10 % environ en temps quasi-réel (météo, pollutions, circulations et trafics). Il semble que certains opérateurs de réseaux franciliens participent à cette initiative, mais que la majorité n'y est pas associée.

Ce travail de doctorat s'inscrit par ailleurs dans le cadre du projet RGC4, sélectionné pour répondre à l'axe 3 du défi 9 de l'appel à projet générique ANR 2015 : Risques, gestion de crise et résilience. Les partenaires de ce projet sont le laboratoire Lab'Urba (EIVP, université Paris Est Marne la Vallée et Créteil), le laboratoire CEMOTEV (centre d'études sur la mondialisation, les conflits, les territoires et



les vulnérabilités, université Versailles Saint Quentin), le laboratoire LITIS (laboratoire d'informatique, du traitement de l'information et des systèmes, université de Rouen) et le laboratoire GéoRessources (équipe géo matériaux, ouvrages et risques, école des Mines de Nancy).

Ce projet, courant de 2016 à 2019, ambitionnait le développement d'outils opérationnels pour l'amélioration de la continuité d'activité des services urbains et des réseaux techniques associés face aux inondations. Concentrées sur le territoire du Grand Paris, les recherches se sont focalisées sur des scénarios de crues importantes de la Seine caractérisées par une cinétique lente.

L'application des travaux et recherches au territoire du Grand Paris a dans un premier temps permis d'élaborer un diagnostic organisationnel et technique des gestionnaires de réseaux face à la crue (Pottier & Richardot, 2017), de construire un état de l'art des inondations à cinétiques lentes dans les grandes agglomérations à travers le monde (Pottier et al., 2019).

Des modèles pour l'aide à la décision concernant les déplacements domicile-travail des salariés des gestionnaires de réseaux impactés par la crue ont également été développés, pour la réorganisation des missions et des lieux de travail (Lhomme et al., 2019a, 2019b). La problématique de l'ouverture de lignes de bus en surface pour pallier les coupures des réseaux souterrains a également été explorée dans une approche d'aide à la décision avec des étudiants des Mines de Nancy dans le cadre d'un projet étudiant.

Un prototype de modèle multi-agents concernant la propagation des défaillances au sein des infrastructures de réseau a été proposé (Olsvik et al., 2018) tandis qu'un modèle multi-agents consolidé a été construit pour les dynamiques d'évacuation des tours de grande hauteur de la dalle Beaugrenelle du XV<sup>ème</sup> arrondissement de Paris (Edjossan-Sossou et al., 2019).

## 8.4. BILAN DE LA SITUATION

L'analyse des connaissances, pratiques, besoins et contraintes des opérateurs de réseaux dans leur gestion des crues en Ile-de-France a permis de compléter la grille d'analyse proposée dans la chapitre 5 concernant les potentialités d'étude et de modélisation des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade.

Il ressort tout d'abord de cette analyse que la problématique des (inter)dépendances et des effets en cascade est aujourd'hui considérée sérieusement par les responsables du risque inondation au sein des différentes organisations, mais que cette considération n'est pas toujours partagée au même niveau par le reste des organisations. De plus, il apparaît que les situations parmi ces parties prenantes demeurent très hétérogènes. Les connaissances disponibles, les outils utilisés et les actions mises en place par les différents acteurs sont ainsi très diverses et représentent des niveaux de maturité divers.

Concernant les facteurs et critères identifiés dans la partie II, on rappelle que la zone d'étude et les parties prenantes ont été présentés dans le chapitre 7. Le Tableau 46 reprend le bilan de l'analyse réalisée en reprenant la grille établie. Nous précisons que les objectifs «théoriques» et «annexes» poursuivis par les décideurs et l'utilisation souhaitée des résultats semblent aujourd'hui difficiles à cerner, et devront être définis par ces derniers et non par nous.

Tableau 46 : Bilan de l'analyse de la situation pour l'agglomération parisienne et ses parties prenantes.

|   | RESULTATS DE L'ANALYSE   |
|---|--|
| Objectifs théoriques des décideurs, selon leur nature         | <p>Les potentiels décideurs et porteurs ne sont ici pas identifiés, et les objectifs théoriques sont donc à définir selon les porteurs potentiels. Ces objectifs peuvent correspondre ou s'inspirer des profils identifiés dans le chapitre 6. Il semble qu'un certain flou existe aujourd'hui chez les différentes parties prenantes, et notamment la Zone de Défense et de Sécurité, quant aux objectifs à atteindre.</p> <p>L'idée d'un outil « complet » permettant la « simulation géographique des défaillances en cascade » est parfois évoquée, tandis que l'utilisation des cartographies de « vulnérabilité » partagées semblent contenter la majorité des acteurs, répondre aux besoins opérationnels exprimés, alors même que ces cartes ne sont pas utilisées de façon poussée et rigoureuse.</p> |
| Utilisation et niveau de détails désiré des résultats         | A définir avec les décideurs, selon les objectifs et les possibilités.   |
| Zone d'étude sélectionnée                                     | <p>La zone d'étude est pour l'instant l'agglomération parisienne, qui s'avère dense, complexe et vulnérable notamment au risque de crue. De nombreuses parties prenantes sont impliquées dans la gouvernance du territoire, et dans la gestion des réseaux urbains face à la crue notamment. Le périmètre de la zone d'étude peut évoluer selon les porteurs et les participants à la dynamique : région, métropole, périmètre des opérateurs participants...</p>  |
| Réseaux urbains implantés et outils métiers utilisés          | <p>Les réseaux urbains implantés au sein de la zone d'étude sont nombreux, divers et complexes. Ils sont gérés à différentes échelles, au niveau de différents périmètres, par divers types de gestionnaires. Ces gestionnaires ont alors des objectifs, ressources et modes de gestion très différents les uns des autres.</p> <p>La situation au sein des opérateurs est aujourd'hui hétérogène, notamment concernant leur niveau de connaissances mobilisable, les données et ressources disponibles, les outils métiers et sectoriels utilisés, mais aussi leur volonté à améliorer la connaissance et la gestion des phénomènes de dépendances et de défaillances en cascade dans leur réseau.</p>  |
| Objectifs politiques, économiques et techniques des décideurs | A identifier par les porteurs. Ces objectifs peuvent correspondre ou s'inspirer de ceux identifiés dans le chapitre 6, mais peuvent fortement varier selon les porteurs et le contexte opérationnel, politique, économique, technique de la zone d'étude. Ces objectifs peuvent également être fortement impactés par les relations qu'entretiennent les acteurs participant à la dynamique.   |
| Volonté et motivation des décideurs                           | <p>On pressent la volonté et la motivation des potentiels décideurs à s'impliquer et à fédérer des actions sur le sujet. Différents niveaux « régaliens » sont identifiés selon les porteurs potentiels. Ceux-ci peuvent faire plus ou moins pression sur les opérateurs et plus ou moins rassembler autour d'eux des personnes volontaires. De plus, leurs missions initiales ont leur importance car elles peuvent s'avérer plus plus ou moins portées sur la technique, la gestion de crise, la réglementation...</p>   |
| Niveau de connaissance mobilisable par les décideurs          | <p>Aujourd'hui, le Secrétariat Général de la Zone de Défense et la DRIEE Ile-de-France semblent être les acteurs ayant la vision la plus globale et poussée du sujet, bien que celle-ci soit encore incomplète du fait des réticences des opérateurs et de la complexité de la problématique. Ces acteurs font désormais appel à des chercheurs spécialistes du sujet et lancent des initiatives collectives autour de la problématique, afin de recueillir les visions et connaissances des autres parties prenantes.</p>   |

|   |  |
|---|--|
|   | Il apparaît cependant que de nombreuses incertitudes et zones d'ombre subsistent, et que les scénarios de défaillances en cascade potentiels ne sont pas tous identifiés.  |
| Niveau de détails et quantité des données disponibles                               | Les données disponibles aujourd'hui concernant la gestion des réseaux face à la crue et plus particulièrement concernant les relations de dépendances et les phénomènes de défaillances en cascade sont disparates selon les sources et les sujets. Les opérateurs n'ont pas les mêmes niveaux de connaissances et de surveillance de leur réseau et de son comportement.  |
| Niveau d'implication potentiel des gestionnaires                                    | Il apparaît que les gestionnaires s'impliquent sur la question de la vulnérabilité de leurs réseaux et des impacts potentiels d'une crue majeure. Bien qu'à des niveaux de connaissances et de volonté hétérogènes, la problématique fait aujourd'hui partie de leurs préoccupations.<br>A l'instar de la plateforme collaborative de partage d'informations, une initiative collective visant à améliorer l'identification et la prise en compte des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade serait probablement accueillie avec bienveillance, à plusieurs conditions : que les objectifs et les modalités soient clairement définies, que les ressources nécessaires soient limitées, que les limites de confidentialité soient respectées. |
| Ressources humaines et budgétaires disponibles pour la mise en place de la démarche | A identifier selon les porteurs et l'approche choisie. A l'heure actuelle, il semble que les personnes qui participeraient à la mise en oeuvre se limiteraient probablement à celles aujourd'hui déjà impliquées sur le sujet. La question des ressources budgétaires est de toute façon à mettre en face des potentielles économies réalisées pour les opérateurs de réseaux.   |

## 8.5. CONCLUSION

Ce chapitre 8 permet de compléter et de consolider le diagnostic de la situation au niveau de la gestion des réseaux techniques dans l'agglomération parisienne. Ces réseaux techniques sont nombreux, très divers, vulnérables et (inter)dépendants. La gestion du risque de crue varie fortement selon la nature, la vulnérabilité, la gouvernance, les dépendances des différents réseaux.

Aujourd'hui, les opérateurs de réseaux considèrent avec attention la problématique des (inter)dépendances et des défaillances en cascade induites dans un contexte de crue, bien que les niveaux de connaissance et les actions menées restent très hétérogènes. On assiste par ailleurs à un foisonnement d'initiatives concernant ce sujet, que ce soit au niveau des chercheurs, des institutions impliquées dans la gestion du risque inondation, des services de l'Etat ou des collectivités. Ces initiatives ont permis l'amélioration des connaissances des relations de dépendances entre les réseaux mais n'ont pas permis de réelle identification et prise en compte des phénomènes de défaillances en cascade, et englobent souvent une partie seulement du territoire concerné.

Bien qu'un certain manque de coordination puisse être constaté, le Secrétariat Général à la Zone de Défense et de Sécurité de Paris et la DRIEE Ile-de-France (et leurs potentiels accompagnateurs scientifiques et techniques) nous semblent être pertinents en tant que moteur d'une démarche collective globale et assez macroscopique. Une multitude de démarches peuvent également être initiées en parallèle, selon des modalités à définir (objectifs, porteurs, granularité, échelles, objets étudiés...). Sans désigner un porteur particulier, des solutions envisageables sous un angle purement technique et théorique ont également été proposées. Ces propositions seront discutées et détaillées dans le dernier chapitre.

# CHAPITRE 9 : PROPOSITIONS ET REFLEXIONS POUR ALLER PLUS LOIN

Le dernier chapitre de ce manuscrit ambitionne la proposition de pistes de réflexion et d'actions à mener dans notre contexte d'étude afin d'améliorer la prise en compte et la prévision des (inter)dépendances et des défaillances en cascade au niveau des réseaux techniques urbains. Le diagnostic élaboré dans les deux chapitres précédents permet en effet d'émettre des recommandations adaptées au contexte et à la situation actuelle. Des exemples de retour d'expérience appliqués aux épisodes de crue de 2016 et de 2018, qui ont inspiré de nombreuses réflexions et nous ont permis d'affiner certaines analyses, sont présentés. Des actions à mener au niveau des cartographies de vulnérabilités utilisées aujourd'hui sont ensuite proposées et détaillées. On souligne ici que ces recommandations et propositions ne sont qu'une étape d'un potentiel travail de co-construction d'une démarche adaptée et porteuse d'améliorations opérationnelles. La nécessité d'une prise de conscience collective et de la mise en place d'une dynamique forte, centralisée et coordonnée sont finalement soulevées.

## 9.1. IDENTIFICATION DES APPROCHES ENVISAGEABLES

### 9.1.1. Les approches théoriquement envisageables

Nous considérons ici la situation technique au niveau de l'agglomération parisienne et les possibilités offertes par celle-ci (outils utilisés, données disponibles...). Nous ne tenons pas compte des questions organisationnelles et opérationnelles (jeux d'acteurs, ressources, portage politique...). Ces approches peuvent être appliquées à différentes échelles, à différentes granularités, en faisant appel à différents types d'analyse et différents outils et méthodes (Bocquentin et al., 2018). Dans un contexte aussi vaste, dense et complexe, il semble en effet très difficile de mettre en place une approche globale prenant en compte tout le périmètre de l'agglomération à une granularité fine. L'idée serait donc d'adapter les niveaux de détail et les périmètres d'étude selon les acteurs impliqués et les problématiques à étudier. Il serait ainsi théoriquement envisageable de proposer plusieurs initiatives s'inscrivant dans les profils identifiés dans le chapitre 6, notamment les suivantes :

- L'application d'un cadre commun d'analyse et de formalisation des relations de dépendance pour tous les opérateurs de l'agglomération parisienne (cf. Profil 1). Il serait notamment possible d'appliquer des modèles fonctionnels, des bases de données orientées graphe, et de s'inspirer des travaux de Toubin (2014).
- La fédération d'outils sectoriels avancés de quelques opérateurs s'avérant compatibles, grâce à la création d'un module central par exemple, pour aider à prévoir les évolutions des réseaux et identifier les infrastructures à surveiller (cf. Profil 6). Les outils utilisés actuellement pour la distribution d'électricité, les télécommunications, ou la distribution d'eau potable peuvent être envisagés.
- L'application de méthodes de sûreté de fonctionnement adaptées (cf. Profil 3) pour l'identification et la quantification de scénarios de défaillances redoutés pour certains réseaux. Une thèse sur le sujet est d'ailleurs en cours de réalisation par Anas Dabaj (EPTB-EIVP-CEREMA), avec des perspectives d'application pour les réseaux de la RATP et d'Enedis, comme préalable au processus de fiabilisation et d'aide à la décision dans la planification de la réduction des risques en phase de relèvement (Dabaj et al., 2020).

Ces démarches ambitieuses semblent cependant difficilement envisageables aujourd’hui à la vue du diagnostic de la situation opérationnelle, notamment concernant le besoin d’un leadership fort et central.

### 9.1.3. Le besoin de leadership

La nécessité d’identifier un ou plusieurs objectifs communs, réalisables et porteurs d’avancées opérationnelles se heurte à la difficulté pour les parties prenantes de notre contexte d’étude d’exprimer leurs besoins et contraintes de façon collective et intelligible. L’hétérogénéité des situations parmi les différentes parties prenantes est également un autre aspect important, et une des raisons de l’observation précédente. Il ressort de nos travaux que la question de la gouvernance et des porteurs des démarches est primordiale, afin notamment d’identifier des objectifs opérationnels communs, réalisables et non utopiques. Devant les limites et difficultés des travaux actuels, la nécessité d’un portage central et fort apparaît alors, ainsi que celle de proposer des démarches s’appuyant sur les initiatives existantes au niveau local. Cette question de mise en commun et de vision collective peut se heurter à l’existence de visions divergentes entre les acteurs, ainsi que les différences de territoires ou d’échelles. A cela s’ajoute également les questions de coordination, selon les niveaux d’exposition au risque mais également selon les capacités et les moyens mobilisables, et les priorités politiques.

Par ailleurs, l’intérêt de l’identification d’acteurs qui porteraient ce type de démarche s’est fait sentir notamment de par la multitude de missions et de problématiques devant être gérées par les acteurs concernés. Les travaux et actions divers et variées en cours, et la complexité organisationnelle de la zone d’étude amènent également à considérer le besoin d’un ou plusieurs leaders centraux, selon les types de démarches. La gestion des risques au sein des réseaux techniques urbains requiert en effet la coordination des nombreuses parties prenantes et des différents échelons administratifs identifiés. Une gouvernance appropriée permet alors d’organiser l’ensemble des politiques publiques et des actions à mettre en place. Un cadre légal et institutionnel solide accompagné de mécanismes de gouvernance adaptés apparaît en effet être une condition nécessaire à une approche intégrée de la gestion des risques, notamment sur la question complexe des réseaux techniques face à une crue majeure.

Des initiatives collectives contraignantes, initiées par des acteurs centraux ayant une certaine force de persuasion, permettraient l’amélioration et l’harmonisation des connaissances, une expression collective des besoins et contraintes, le partage d’informations centralisées, un travail collaboratif et l’assurance d’une approche cohérente et globale sur le long terme. L’ensemble des informations et données relatives aux risques et à leurs impacts pourrait ainsi être centralisé (et mis à jour) en respectant les contraintes liées aux questions de confidentialité, de sécurité et de concurrence, ainsi que des outils de formalisation et de modélisation. Différentes démarches complémentaires d’étude et de modélisation des phénomènes d’(inter)dépendances et de défaillances en cascade au sein des réseaux techniques urbains pourraient alors être établies, selon diverses modalités (granularité, acteurs impliqués, réseaux concernés, échelle spatiale, suivi et mise à jour...) à définir en accord avec les objectifs poursuivis.

Les évolutions institutionnelles en cours, les crues de ces dernières années, ainsi que le dynamisme et l’engagement des parties prenantes offrent une réelle fenêtre d’opportunité. Tel est le sens des recommandations proposées par l’OCDE qui considère par exemple que les projets d’infrastructure, de développement et de renouvellement urbain du Grand Paris ainsi que les futurs Jeux Olympiques 2024 représentent des opportunités à saisir, afin de devenir une agglomération résiliente modèle. Le rapprochement entre la Préfecture de Police et la DRIEE pourrait alors se poursuivre, notamment avec

les secteurs de l'assurance et les collectivités locales. Concernant les objectifs communs à définir, plusieurs pistes sont envisageables comme décrit dans le chapitre 6. La mise en place d'un « niveau de résilience » prédéfini a été évoquée précédemment par l'OCDE (OCDE, 2014, 2018) et pourrait s'appliquer progressivement aux opérateurs réseaux afin de renforcer les exigences. L'établissement de niveaux d'exigence et leur contrôle pour les nouvelles infrastructures, notamment de transport, incomberait alors à un porteur central occupant le rôle de régulateur. L'identification de tous les liens de dépendances selon une méthodologie partagée, et un processus de construction et de partage commun des cartographies de vulnérabilités-fragilités pourraient également être proposé comme discuté précédemment. Cette dynamique collective ne doit cependant pas prendre le pas sur des relations bilatérales ou en groupes restreints, notamment au sein des opérateurs. L'enquête auprès des gestionnaires a effet permis de diagnostiquer qu'un espace ou des moyens (virtuels ou physiques) d'échanges plus informels entre les opérateurs seuls pour discuter de certains points plus techniques ou délicats pourraient être bénéfiques à la dynamique de travail collaboratif. Des échanges se font aujourd'hui parfois en bilatéral sur un point spécifique mais ne sont pas étendus et généralisés.

De surcroît, l'un des enseignements tirés de l'analyse des tentatives d'implémentation de démarches expérimentales sur des zones d'étude réelles est la nécessité de s'appuyer sur les initiatives déjà en place au sein de cette zone. Ces travaux doivent être capitalisés, centralisés et analysés, afin de continuer les recherches de façon cohérente. S'appuyer sur les initiatives en place permet également de rassembler plus facilement les acteurs concernés autour de la démarche envisagée, de gagner du temps, et de proposer une démarche réalisable et adaptée au contexte et aux besoins de ces acteurs. Concernant l'agglomération parisienne, il semble donc judicieux de s'appuyer sur les travaux en cours tels que ceux découlant de la déclaration d'intention comme la construction et l'échange des cartographies de « vulnérabilité ». La capitalisation des enseignements découlant des ateliers et exercices de gestion de crise semble également pertinente, en attendant que des initiatives plus ambitieuses, cadrées et portées par un acteur central fort sur le long terme ne voient le jour.

### 9.1.2. Les approches basées sur le contexte opérationnel actuel

Le diagnostic réalisé et les réflexions menées sur les démarches envisageables de façon « théorique » nous amènent à examiner des profils-types de démarches pouvant être aisément mis en œuvre dans notre contexte d'étude, et s'appuyant sur les initiatives en cours et les ressources disponibles. Comme discuté dans le chapitre 6, la recherche d'une perspective unique concernant des scénarios complexes relatifs à des réseaux complexes et (inter)dépendants peut être réductrice. Il semble alors pertinent de développer non pas une mais plusieurs démarches, chacune construites pour répondre à un objectif plus modeste. Les résultats obtenus peuvent ensuite être mis en relation, centralisés ou comparés. Il nous semble ainsi que des démarches visant à réaliser un diagnostic global des réseaux techniques urbains et à identifier des zones géographiquement sensibles et vulnérables à un événement initiateur donné pourraient être adaptées à celui-ci.

La construction d'un diagnostic global au niveau des réseaux techniques urbains, et l'identification de nouveaux liens d'(inter)dépendances dans un contexte de crue au sein de l'agglomération parisienne, sont les premières étapes à considérer. Le profil n°1 correspondant est rappelé dans le Tableau 47 ci-dessous. Ce type de démarche est déjà en cours de réalisation, et a notamment été initié par les actions du pôle de gestion de crise de la Ville de Paris et les recherches de Toubin (2014) au niveau des gestionnaires de réseaux parisiens à partir de 2011. Cependant ce travail demeure informel, incomplet et non centralisé. Une trame et un formalisme partagés, ainsi qu'une mise à jour, pourrait alors permettre d'obtenir une cartographie fonctionnelle centrale des réseaux et de leurs relations macroscopiques.

Tableau 47 : Réaliser un diagnostic global des réseaux techniques urbains, identifier de nouvelles (inter)dépendances.

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| Etapes méthodologiques             | Identification des (inter) dépendances ; formalisation des (inter) dépendances.   |
| Approche correspondante            | Approche holistique, ascendante et empirique.   |
| Systèmes considérés et granularité | Les systèmes considérés sont l'ensemble des réseaux techniques, avec une granularité macroscopique au niveau des entités « réseaux ».   |
| Données nécessaires                | Les données nécessaires relèvent de l'expertise générale, des retours d'expérience, des données en libre accès sur les relations fonctionnelles entre les réseaux. La récolte de données supplémentaires peut se faire par ateliers collaboratifs et exercices, interviews d'experts. |
| Résultats obtenus                  | Cartographie fonctionnelle des réseaux et de leurs relations macroscopiques. Possibilité de ne pas utiliser de modélisation en tant que telle, ou une modélisation macroscopique économique ou fonctionnelle.   |
| Conditions d'implémentation        | Implication raisonnable des parties prenantes, quelques mois de mise en place à prévoir, besoin d'un porteur central.   |
| Exemples d'outils et méthodes      | Utilisation d'une trame systémique et d'un formalisme partagé. Possibilité d'appliquer des modèles fonctionnels, des modèles de type IOM (Input-Output Model), ou des bases de données orientées graphe.  |

Par ailleurs, l'identification de zones géographiques sensibles et vulnérables à l'aléa inondation au sein de l'agglomération parisienne par l'intermédiaire des réseaux techniques urbains semble également pertinente. Ce profil de démarche n°4 est rappelé dans le Tableau 48.

Tableau 48 : Identifier des zones géographiques sensibles et vulnérables à un événement initiateur donné.

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| Etapes méthodologiques             | Identification des (inter) dépendances ; formalisation des (inter) dépendances ; modélisation des relations d'(inter)dépendances et des défaillances en cascade induites.  |
| Approche correspondante            | Approche ascendante ou descendante.  |
| Systèmes considérés et granularité | La granularité peut varier du groupe d'infrastructures au composant, selon la précision spatiale attendue. Les systèmes considérés sont les infrastructures ponctuelles et linéaires (et leurs composants) et les zones qu'elles desservent.   |
| Données nécessaires                | Il est nécessaire d'obtenir des données sur les scénarios des événements initiateurs considérés et leur périmètre d'action, les vulnérabilités des infrastructures étudiées, les liens de dépendances qu'elles entretiennent, les périmètres des zones desservies par chacune... L'expertise sectorielle et les outils métiers peuvent être mis à contribution, ainsi que des cartographies de vulnérabilité selon les scénarios étudiés. Des exercices de simulation peuvent également être mis en place pour compléter les informations. |
| Résultats attendus                 | Cartographie des zones géographiques susceptibles de connaître des défaillances de plusieurs réseaux en cascade selon les scénarios d'événements initiateurs considérés et les propagations spatiales des impacts.   |
| Conditions d'implémentation        | Définition de scénarios d'aléas ou événements redoutés, choix d'hypothèses souvent nécessaires (notamment pour les liens physiques (et non plus génériques) entre les infrastructures et pour les zones desservies par chaque infrastructure), implication forte des gestionnaires des réseaux participants. Question de la sensibilité des résultats de simulation impliquant des zones urbaines réelles.   |
| Exemples d'outils et méthodes      | Il est possible de réaliser un couplage faible de simulateurs sectoriels déjà utilisés par les gestionnaires, ou un couplage de cartographies de vulnérabilité.  |

En effet, les démarches engagées concernant les cartographies de vulnérabilités et les échanges se mettant en place parmi les parties prenantes laissent présager la possibilité pratique de cette démarche. Cette proposition est justifiée, développée et explicitée ci-dessous. Un travail sur des indices communaux est également proposé à la suite.

Nous proposons donc trois approches complémentaires susceptibles d'améliorer la connaissance et la compréhension des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade, d'identifier de nouvelles dépendances entre les services, d'évaluer les impacts directs et indirects d'une crue majeure sur l'agglomération parisienne, de consolider les relations entre les parties prenantes, de produire des éléments nouveaux pour l'aide à la décision et la gouvernance.

Nous présentons tout d'abord une méthodologie d'analyse de retours d'expériences pour l'identification et l'évaluation des relations de dépendances existantes au sein des réseaux et de leurs conséquences. Nous proposons ensuite un cadre de construction et d'utilisation des cartographies des prévisions de dysfonctionnements basé sur les pratiques actuelles. Puis finalement nous esquissons la possibilité de construire des indices communaux portant sur l'état de fonctionnement des réseaux techniques urbains. Nous précisons ici que seuls certains extraits des résultats des analyses concernant les données partagées par les opérateurs vers la plateforme collaborative sont ici présentés, afin d'illustrer les propos sans rompre les exigences de confidentialité.

## 9.2. ETUDE DES PHENOMENES PAR L'ANALYSE DE REX

Nous présentons ici une méthodologie de retour d'expérience pour l'analyse des événements impliquant des réseaux techniques urbains, afin de mettre en lumière les phénomènes de dépendances et les cascades induites. Cette méthodologie est appliquée aux événements de crue survenus dans la zone d'étude en 2016 et 2018.

### 9.2.1. Méthodologie proposée

#### 9.2.1.1. Collecte des informations

Ces analyses sont fondées sur des recherches bibliographiques, ainsi que sur des échanges avec les opérateurs de réseaux touchés pour les crues de 2016 et 2018. Une veille au niveau de la presse et des réseaux sociaux a été effectuée en temps réel, réalisée en partie par Jenna Daniel durant son stage pour la crue de 2016 (Daniel, 2017c), et des rapports de retours d'expérience institutionnels (CCR, 2016, 2018; CGEDD, 2018; DRIEE IDF, 2016) et de questionnaires ont également pu être consultés, en parallèle de la participation à des réunions bilans et retours d'expériences avec les parties prenantes ainsi que des échanges avec les gestionnaires au cours de l'enquête.

Les informations fournies par l'EPTB et Vigicrue ont également permis de suivre et de retracer ensuite la dynamique et la gestion de la crue.

#### 9.2.1.3. Analyse des défaillances des réseaux techniques et des défaillances en cascade engendrées

Les défaillances recensées au sein des différents réseaux techniques urbains ont été répertoriées parmi les différents documents et médias mis à contribution. L'enquête auprès des opérateurs, présentée dans le chapitre 8, a également permis de compléter certaines informations concernant les impacts des crues de 2016 et 2018.



Le Tableau 49 reprenant les défaillances et dysfonctionnements observés pour chaque réseau a été utilisé. Les mesures palliatives mises en place sont également indiquées si possible. Et les conséquences de relations de dépendances entre différents réseaux sont également recensées dans une troisième colonne lorsque le lien est clairement identifié.

Tableau 49 : Grille d'analyse des défaillances recensées lors d'un événement de crue passé.

| Réseau | Défaillances et solutions palliatives | Cascades |
|--------|---------------------------------------|----------|
|        |                                       |          |

#### 9.2.1.4. Application de l'AMDE

Une application de l'AMDE à l'analyse de ces retours d'expérience, proposée et explicitée dans le chapitre 5, a été ensuite réalisée. Pour rappel, la première étape est l'analyse des REX existants et leur formalisation sous un format compatible avec les exigences d'une AMDE. La deuxième étape est l'application de l'AMDE aux connaissances collectées.

Cette application permet alors de combiner plusieurs sources d'informations hétéroclites, d'organiser les informations de façon à pouvoir les traiter facilement, de mettre en avant et de rendre lisible certains phénomènes de cause à effet. Le Tableau 50 reprend la formalisation générique proposée dans le chapitre 5, qui sera ici appliquée pour certains éléments du réseau de distribution d'électricité durant la crue de 2018.

Tableau 50 : Extrait de l'application de l'AMDE aux retours d'expérience

| Service | Réseau et sous-réseau | Composant | Quantité impactée | Zones | Causes possibles (s) | Quantité concernée | Défaillance | Effets possibles (s) | Quantité concernée bis | Zones bis | Sources |
|---------|-----------------------|-----------|-------------------|-------|----------------------|--------------------|-------------|----------------------|------------------------|-----------|---------|
|         |                       |           |                   |       |                      |                    |             |                      |                        |           |         |

#### 9.2.2. Résultats obtenus

Trois retours d'expérience de crues concentrés sur les réseaux techniques ont été réalisés (dont celui de la crue centennale de 1910 en annexe) et formalisés grâce à la grille présentée dans le Tableau 49. Nous reprenons ci-dessous l'événement de crue en lui-même, et son déroulé. L'aléa en question est repris au niveau de sa temporalité, de sa géographie, de sa magnitude et de sa gestion par l'EPTB Seine Grands Lacs. Nous détaillons ensuite les défaillances constatées au niveau des différents réseaux techniques existants et si possible les impacts de ces défaillances par le biais de dépendances avérées.

##### 9.2.2.1. La crue de juin 2016

A la fin du mois de mai 2016, la France, et notamment l'Île-de-France, est touchée par d'importantes précipitations ainsi que des orages. Les sols sont alors déjà saturés en eau et une crue du Loing est annoncée le 30 mai pour le lendemain, qui se révèle exceptionnelle en particulier dans le Loiret. Les niveaux historiques de 1982 et de 1910 sont dépassés sur le Loing dans la nuit, qui connaît une crue exceptionnelle. Une digue du canal de Briare rompt et une partie des eaux se déverse dans le canal. La hauteur maximum sera atteinte dans la nuit du 1<sup>er</sup> au 2 juin. Des crues de la Sauldre et de l'Orne suivent

également. Il est annoncé que les ondes de crues sur l'ensemble des affluents vont converger vers le tronçon de la Seine à Paris et générer une hausse des niveaux d'eau les jours suivants.

La crue de la Seine dans l'Essonne et la Seine-et-Marne se déclare le 2 juin au matin et en Ile-de-France l'après-midi, tandis que la crue exceptionnelle du Loing continue. Les prévisions données restent incertaines en raison des précipitations toujours en cours ainsi que des incertitudes liées aux événements rares survenant le long du Loing. Ce dernier entre en décrue le 3 juin, tandis que les crues sur les bassins de la Seine et du Cher restent importantes jusqu'au 6 juin.

Le maximum annoncé à la station de mesure Paris Austerlitz était de 4 à 4,5 mètres au début de l'événement, et a évolué jusqu'à 6,5 mètres les jours suivants. Un dysfonctionnement du puits de mesures à la station de Paris Austerlitz durant la nuit du 2 au 3 juin a entraîné pendant 18 heures un écart de mesure allant jusqu'à 30 cm. Le maximum a été atteint dans la nuit du 3 au 4 juin avec un pic à 6,10 mètres, soit 5 cm en dessous de la crue de 1982. Une photo capturant les berges de la Seine à Paris le 03 juin est présentée en Figure 135. Le 11 juin, tous les tronçons ont retrouvé un niveau de vigilance verte.

Les quatre lacs-réservoirs gérés par l'Etablissement Public Territorial Seine-Grands-Lacs, étaient par ailleurs remplis à 90% durant cette période estivale, car ils sont destinés à soutenir l'étiage durant les périodes sèches. Ils n'ont donc pas pu remplir entièrement leur rôle de prévention des inondations. Durant l'événement ces lacs ont tout de même permis de stocker jusqu'à 68 m<sup>3</sup>/s le 3 juin, et au total plus de 30 millions de m<sup>3</sup>, ce qui a permis une diminution de 5 cm de la hauteur d'eau maximale atteinte à Paris le 3 juin au soir.



Figure 135 : Les berges de la Seine en crue le 03/06/2016, avec le Square du Vert-Galant immergé. Crédits : Auteur.

Avec du recul, la période de retour de cet événement a été estimée à 20 ans pour la Seine en aval de la confluence avec le Loing et jusqu'à la confluence avec l'Oise. En aval de la confluence avec l'Oise (et donc après Paris), la période de retour ne dépasse pas les 10 ans. Le Loing a atteint 4,63 m à Nemours, hauteur supérieure de 38 cm par rapport au niveau atteint en 1910. Des crues exceptionnelles ont également été observées sur les affluents de la Seine moyenne et de la Marne en Ile-de-France, notamment l'Essonne, le ru d'Ancoeur, l'Yerres, l'Yvette, la Mauldre, le Petit Morin et le Grand Morin (DRIEE IDF, 2016). La Figure 136 reprend les périodes de retour des crues observées sur le bassin versant estimées au moment de la rédaction du retour d'expérience du CGEDD en 2017 (CGEDD, 2017).

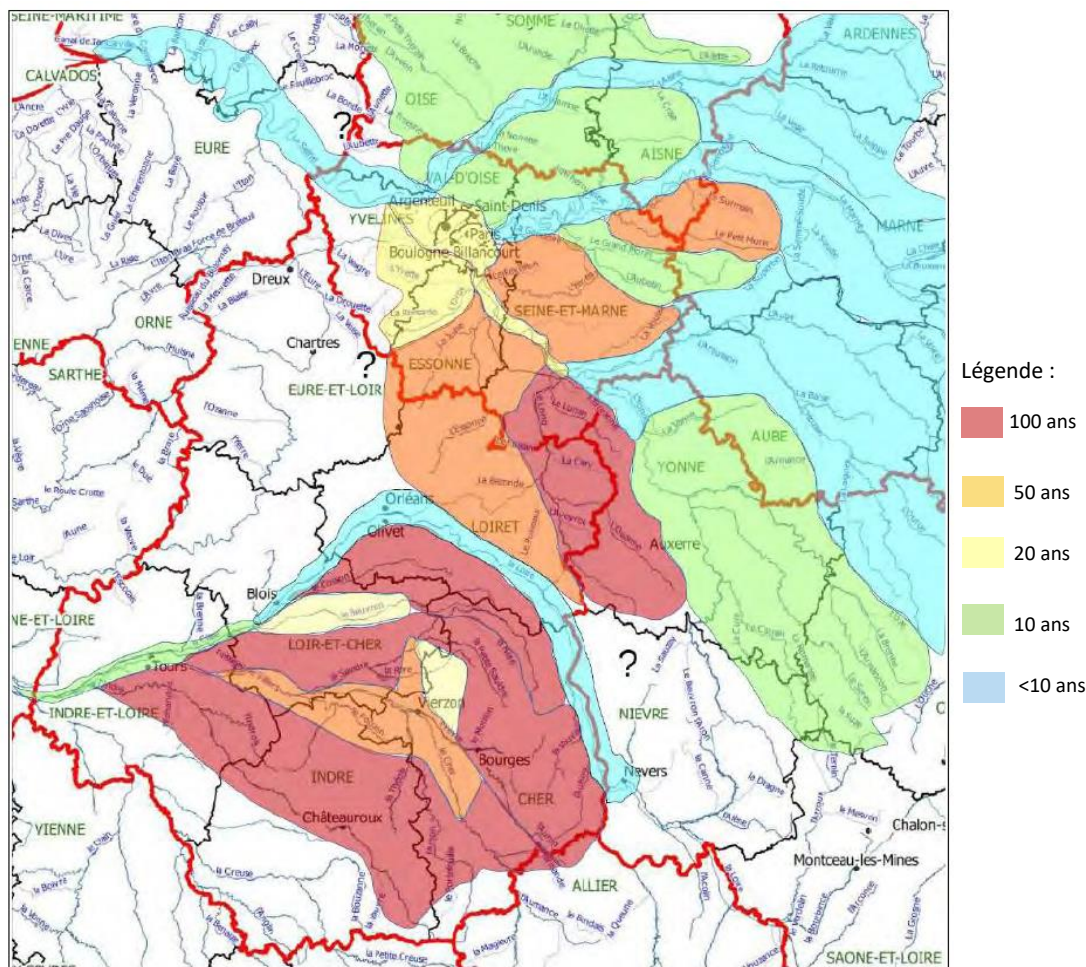


Figure 136 : Périodes de retour des crues observées sur les différents cours d'eau du bassin versant en 2016. Source : (CGEDD, 2017).

Les défaillances recensées au sein des différents réseaux techniques urbains sont répertoriées dans le Tableau 51. Ce tableau reprend les défaillances et dysfonctionnements répertoriés, ainsi que les mesures palliatives mises en place pour les différents réseaux techniques urbains touchés. Les conséquences de dépendances entre différents réseaux sont également recensées dans la dernière colonne lorsque les informations étaient disponibles, ce qui n'est pas souvent le cas.

Ce tableau n'a donc pas pour prétention d'être exhaustif, car la collecte d'informations s'est principalement appuyée sur des sources indirectes et que les phénomènes de dépendances ne sont pas souvent formalisés et répertoriés en tant que tels.

Tableau 51 : Défaillances recensées au sein des réseaux techniques urbains lors de la crue de mai et juin 2016.

| Réseau                     | Défaillances et solutions palliatives  | Cascades  |
|----------------------------|--|---|
| Distribution d'électricité | Les coupures d'électricité, principalement dues à l'inondation de postes de transformation, ont touché plus de 9 000 clients en Essonne, plus de 9 000 en Seine-et-Marne, près de 2 000 dans le Val-de-Marne (chiffres surestimés) et jusqu'à 2 000 dans les Yvelines. A Paris, les postes sources vulnérables ont été protégés par des aqua barrières et trois postes de transformation ont été coupés, correspondant à une vingtaine de clients. | Les coupures électriques ont notamment entraîné l'arrêt de certains systèmes de signalisation des transports en commun, des dysfonctionnements des réseaux d'éclairage public, ou des dysfonctionnements des installations d'autres réseaux |

|                      |  |  |
|----------------------|--|--|
|                      | <p>La FIRE (Force d'Intervention Rapide d'Electricité) d'Enedis a été mobilisée pour l'acheminement de groupes électrogènes et des travaux de réparation et remise en service. Le 5 juin près de 70% des 25 000 clients coupés au total étaient rétablis, et près de 90% l'étaient le 7 juin.</p>  | dépendantes de leur alimentation électrique au niveau des habitations (téléphonie, compteurs, etc.)  |
| Chauffage urbain     | <p>Le site de production de chaleur au niveau de l'incinérateur d'Ivry-sur-Seine est arrêté le 2 juin au soir, et une centaine de bâtiments est donc privée d'eau chaude à Paris et en proche banlieue (principalement à Boulogne-Billancourt) correspondant à près de 8 600 foyers. Des chaudières mobiles ont été installées pour pallier cette coupure.</p>   |  |
| Télécommunications   | <p>Des mesures préventives de protection des installations ont été mises en place. Plusieurs centraux ont été protégés, comme celui de Corbeil, et ont été sécurisés par un groupe électrogène. Des rondes de nuit autour de certaines installations, notamment des datacenters, sont organisées.</p> <p>Le 7 juin, 11 000 foyers en Essonne subissaient des coupures téléphoniques et Internet. Aucune coupure du réseau mobile n'a été constatée. Des mobiles ont été distribués aux collaborateurs et à des élus dont la ligne était coupée.</p>  |  |
| Transports en commun | <p>Le 2 juin, les mesures de prévention concernant la ligne du RER C débutent par la fermeture des baies d'aération le long de la Seine puis la fermeture du RER C intra-muros (voir Figure 137). La SNCF a démonté 300 équipements électriques le long des voies. Le 3 juin, du matériel destiné à édifier des protections à l'abords des stations de métro a été acheminé mais non utilisé après la revue à la baisse des prévisions. Les stations Cluny-la-Sorbonne (M10) et St-Michel (RER B et M4) ont été fermées suite à des infiltrations rendant les quais glissants. Les travaux de remise en service du tronçon intra-muros du RER C débutent le 7 juin et le trafic reprend le 10 juin au matin.</p> <p>Certains tronçons du RER D, des lignes de Transilien R et N ont été fermés pendant plusieurs jours ; suite à des glissements de terrain, la rupture d'une canalisation ayant provoqué une rupture du remblai, et l'inondation de certaines gares. Des bus de substitution ont été mis en place, sauf pour la ligne R car le réseau routier était également impraticable jusqu'au 8 juin.</p> | <p>Les impacts sur les déplacements ont été nombreux, notamment pour les déplacements domicile-travail. Certains opérateurs ont dû s'organiser face aux difficultés de transport de certains de leurs salariés.</p>  |
| Réseau routier       | <p>L'A10 est inondée et coupée le 1<sup>er</sup> juin à partir de St Arnoult pour la direction Sud. Des moyens de pompages et des digues sont mis en place dès le lendemain, afin de mettre en place un corridor sec le 5 juin matin pour l'accès des dépanneuses. La réouverture complète a lieu le 10 juin matin.</p> <p>De nombreux axes routiers sont inondés à travers la région, notamment dans le département de Seine-et-Marne. Concernant les voies sur berges, la voie Georges Pompidou est fermée de Mazas au tunnel des Tuileries le 31 mai pour rouvrir le 10 juin tandis qu'une partie du tunnel du Quai de Bercy est inondée à partir 2 juin. Le tronçon entre le Pont du Garigliano et le pont de Bir-Hakeim est également fermé entre le 2 et 10 juin. Plusieurs</p>  | <p>Les impacts sur les déplacements ont été nombreux, notamment pour les déplacements domicile-travail. Certains opérateurs ont du s'organiser face aux difficultés de transports de certains de leurs salariés.</p> |

|                |   |   |
|----------------|---|---|
|                | <p>bretelles d'accès à l'autoroute A4 sont fermées le 2 juin. Le tunnel Duplex A86 est fermé de manière préventive le 3 juin après-midi et rouvre le 6 juin sans avoir été touché.</p> <p>De nombreux embouteillages ont fait suite à ces fermetures. Des inspections du terrain et de la chaussée ont dû être menées à la suite des submersions.</p>   |   |
| Gaz            | <p>Des coupures de gaz ont été observées au bois de Boulogne. En Seine-et-Marne, des réseaux de gaz basse pression ont été coupés préventivement et ont impacté une centaine de clients.</p>  |   |
| Eau            | <p>En Seine-et-Marne, la production d'eau potable a été impactée et une quarantaine de communes sur 500 ont connu des restrictions d'alimentation en eau potable tandis que 8 communes ont été alimentées par des citernes et des bouteilles. La commune de Souppes-sur-Loing été totalement coupée et la qualité de l'eau n'a été rétablie qu'après 1 mois et demi.</p>  |   |
| Assainissement | <p>En Seine-et-Marne, 22 stations d'épuration ont été arrêtées pendant une moyenne de 6 jours. Quelques systèmes de gestion des eaux usées ont également dysfonctionné en Essonne. Des postes électriques ont été surélevés, notamment au niveau de stations de pompage.</p>  | <p>La dépendance du réseau routier au réseau d'assainissement a été soulignée par des inondations de la chaussée dues à des rejets.</p> |
| Déchets        | <p>De nombreux déchets ont été produits par le passage de l'eau, notamment en Val-de-Marne et surtout en Seine-et-Marne et dans l'Essonne. De nombreux déchets ont été observés flottant à la dérive, même dans Paris intra-muros, et des collectes exceptionnelles ont dû être organisées.</p> <p>Les coûts de gestion de ces déchets ont été importants et des soucis logistiques ont émergé, concernant notamment l'apparition de plateformes irrégulières et le manque de moyens. Les pollutions engendrées ont été limitées.</p> |   |



Figure 137 : Infiltrations sur les voies du RER C près de la station Javel. Crédits : Joel Saget / AFP.

Cet événement est devenu une nouvelle référence pour des crues généralisées sur une partie importante du territoire français. Il a également permis de rappeler que ces phénomènes peuvent survenir à tout moment de l'année, et la période de vigilance a ainsi été étendue. Cette crue n'a pas eu d'effet majeur sur les grandes agglomérations dans les vallées très urbanisées de la Seine et de la Loire et n'a duré que quelques jours. Concernant les dysfonctionnements relevés, les transports ont été touchés de façon ponctuelle, les coupures d'électricité ont été locales et de courte durée, et les télécommunications ont connu des dysfonctionnements limités. La nécessité de la sécurisation des réseaux de distribution d'électricité, notamment en Ile-de-France, a cependant été soulignée dans les rapports de retour d'expérience (CGEDD, 2017). Les évacuations ont été nombreuses, mais de façon localisée et sans effet de masse.

Compte-tenu des remontées de ses clients, la Caisse Centrale de Réassurance estime à la suite de l'événement que les dommages assurés sur l'ensemble des zones touchées devraient avoisiner 1,2 milliard d'euros (CCR, 2016). Le débordement des cours d'eau a causé des dommages très importants, et les communes de Nemours, Montargis, Melun et Longjumeau figurent parmi les plus sinistrées. Le rapport du CGEDD (2017) souligne qu'à la possibilité d'une crue majeure doit s'ajouter la possibilité de la crue simultanée de nombreuses rivières et des principaux fleuves français, de façon similaire aux événements de 1846, 1856 et 1866 notamment.

#### 9.2.2.2. La crue de janvier et février 2018

Les mois de décembre 2017 et janvier 2018 ont été marqués par la succession d'événements météorologiques, en particulier les tempêtes Carmen et Eleanor sur la moitié nord de la France début janvier. La pluviométrie cumulée de l'ensemble du territoire français sur les mois de décembre et janvier est la plus forte enregistrée sur la période allant de 1959 à 2018. Le bassin de la Seine a connu des cumuls mensuels supérieurs de 30 à 60 % aux normales saisonnières pour le mois de décembre, ce qui a contribué à la saturation des sols. Deux épisodes pluvieux majeurs se sont ensuite succédés du 3 au 6 janvier et du 15 au 22 janvier, le secteur de l'Yonne et de la Seine amont enregistrant l'excédent le plus important. Les précipitations cumulées des mois de décembre et janvier 2018 sont représentées de façon cartographique par la Figure 138.

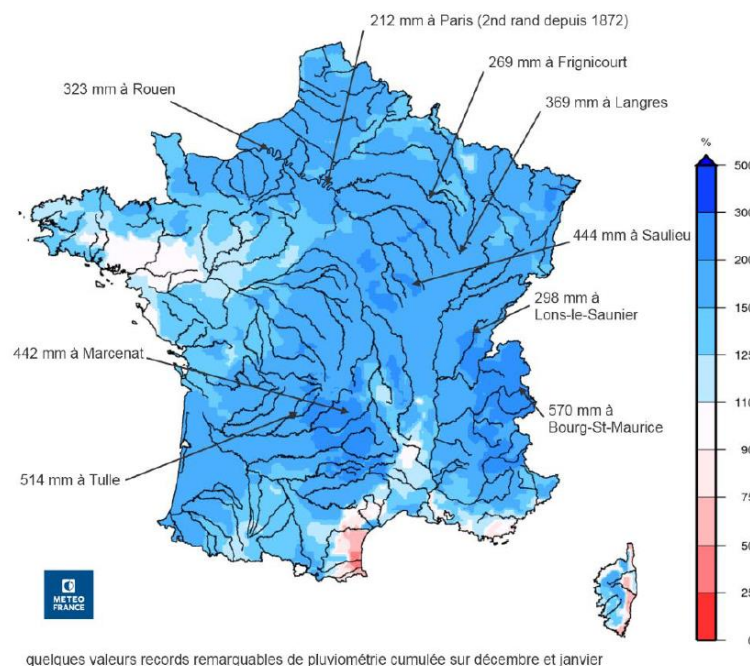


Figure 138 : Précipitations cumulées des mois de décembre et janvier 2018. Source : (Météo France).

Le phénomène s'est composé de plusieurs phases, au gré des précipitations, avec une montée des eaux sur plusieurs jours puis une lente décrue, cette cinétique a permis la mise à l'abri de certains biens mais a également prolongé l'immersion d'autres, aggravant ainsi les dommages causés.

Le 5 janvier, les affluents franciliens réagissent aux précipitations intenses du 3 et 4 janvier, entraînant une hausse des rivières principales. Ainsi le tronçon Marne aval est en vigilance jaune depuis le 2 janvier et Paris depuis le 3 janvier. Le bassin de l'Yonne réagit également aux dernières précipitations intenses et est depuis le 4 janvier placé en vigilance orange. En région parisienne, la hausse va se poursuivre et s'intensifier durant les jours prochains avec l'arrivée de l'onde de crue en provenance de l'Yonne. Les jours suivants et au vu des prévisions de pluviométrie, une aggravation de la situation n'est pas prévue. La décrue s'amorce lentement à partir de dimanche 7 janvier au soir. Au 11 janvier, les pointes de crue ont été observées sur l'ensemble des cours d'eau et la décrue est amorcée. Le stockage au sein de lacs-réservoirs, dont l'action permet de diminuer de 30 à 40 cm les niveaux d'eau en Ile-de-France, se poursuit.

Le bassin a connu une accalmie la deuxième semaine de janvier, mais un nouvel épisode pluviométrique prend place à partir du 16 janvier. Les cours d'eau ont alors fortement réagi aux précipitations. Il est annoncé que les pointes de crue dépasseront les valeurs atteintes en début de mois. Météo France passe alors l'ensemble des départements de la région Ile-de-France, à l'exception de l'Essonne, en vigilance orange inondation.



Figure 139 : La commune de Villeneuve-Saint-Georges sous les eaux le 25/01/2018. Crédits : Thomas Samson / AFP.

Le 22 janvier, les prévisions estiment que le pic de crue est attendu à Paris le 26 janvier autour de 6 mètres et le 24 janvier ces prévisions sont revues à la hausse pour un pic attendu le 27 janvier autour de 6,2 mètres car un nouvel épisode pluvieux modéré est annoncé. La décrue amorcée sur les tronçons Yonne amont, Armançon et Serein est ralentie et de nouvelles hausses se produisent à l'amont. Sur le bassin du Loing de nouvelles crues sont en cours. Les lacs-réservoirs atteignent petit à petit leur maximum de remplissage.

La pointe de la crue pour la Seine à Paris a été observée lundi 29 janvier, avec 5,84m à la station d'Austerlitz, tandis que la crue continue sa propagation sur la Marne. Sur cette pointe de crue, l'action des lacs-réservoirs a permis une diminution des niveaux d'eau de l'ordre de 45 cm à Paris, et de plus de 50 cm sur la Marne. Les experts du Service de Préviation des Crues estiment que la crue est très lente, et qu'il ne faut pas parler de pic mais plutôt de plateau ayant atteint son maximum. Les niveaux d'eau vont en effet rester élevés les jours suivants.

Paris [Austerlitz - Station ultrason] (Seine) - Hauteurs - 30/01/2018 09:56

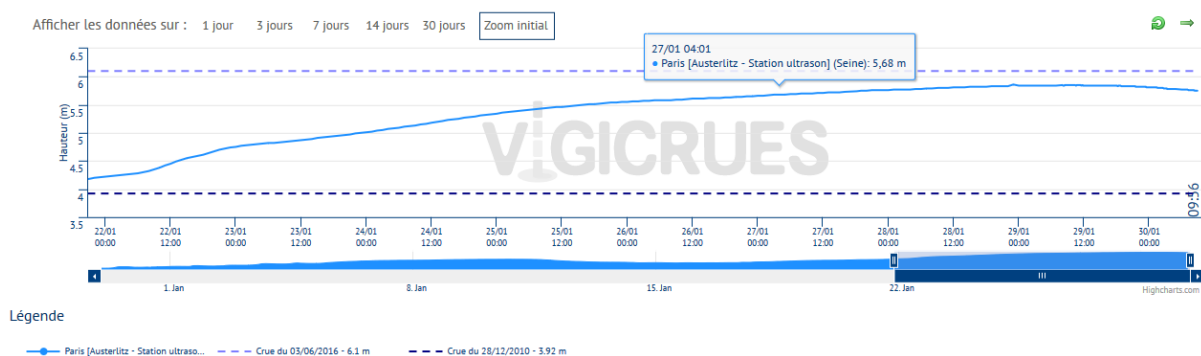


Figure 140 : Hauteur d'eau de la Seine mesurée à la station de Paris Austerlitz entre le 22/01 et le 31/01. Source : Vigicrue.

Le 4 février, la décrue se poursuit lentement sur la Seine et la Marne. Pour les boucles de la Seine et l'Oise aval, après une stabilisation dimanche et lundi, la décrue ne débute que le 5 février. Les prévisions météorologiques resteront favorables à la décrue qui concernera l'ensemble du territoire les jours suivants.

Paris [Austerlitz - Station ultrason] (Seine) - Hauteurs - 05/02/2018 09:41



Figure 141 : Hauteur d'eau de la Seine mesurée à la station de Paris Austerlitz entre le 06/01 et le 05/02. Source : Vigicrue.

Finalement, la crue pour la Seine moyenne a été légèrement inférieure à celle de juin 2016, hormis à Montereau où les niveaux maximums ont été comparables à ceux de janvier 1982. A l'amont des lacs-réservoirs Seine, Aube et Marne ainsi que sur l'Armanche, on estime que la période de retour de l'événement est cinquante ans. La crue à Paris a également été légèrement inférieure à celle de juin 2016 sur Paris, mais supérieure à juin 2016 sur la station de Chatou. Une crue modérée a parcouru l'Oise aval francilienne, et une crue plus importante a parcouru la partie aval du tronçon sous l'influence de la Seine, tandis que les niveaux sur les boucles de la Seine étaient supérieurs à ceux de juin 2016 et comparables à ceux atteints en 2001. Le temps de retour de la crue de la Seine à Paris et à l'aval de la confluence avec l'Oise est estimé entre 10 et 20 ans. Même si la hauteur de crue atteinte à Paris Austerlitz est équivalente à celle de mai 2016, les phénomènes hydrologiques sont très différents.

Les défaillances recensées au sein des différents réseaux techniques urbains sont répertoriées dans le Tableau 52. Ce tableau reprend les défaillances et dysfonctionnements, les mesures palliatives et les conséquences de dépendances entre les différents réseaux. De la même façon que pour le premier retour d'expérience, ce tableau n'a pas pour prétention d'être exhaustif.



Tableau 52 : Défaillances recensées au sein des réseaux techniques urbains lors de la crue de janvier et février 2018.

| Réseau - Opérateur         | Défaillances et solutions palliatives   | Cascades  |
|----------------------------|---|---|
| Distribution d'électricité | <p>Au 5 janvier, Enedis dénombre un peu plus de 10 000 clients (correspondant à un compteur) privés d'électricité en Ile-de-France, en conséquence de la première vague de crue, avec près de 4 500 en Essonne et 3 500 en Seine-et-Marne. La FIRE est mise à contribution.</p> <p>La deuxième vague de crue fin janvier remobilise les équipes et Enedis met en place des moyens de pompage, des groupes électrogènes et des protections notamment dans le Val-de-Marne, la Seine-et-Marne et les Yvelines. Au 27 janvier, jusqu'à 14 000 foyers ont été privés d'électricité sur l'ensemble du territoire. Ils ne sont plus que 1 900 le 29 janvier, 1 500 le 30, et 1000 le 02 février, essentiellement dans l'est de la région parisienne. Le 5 février, on estime que 1400 clients sont coupés en Ile-de-France.</p>   | <p>Des dysfonctionnements faisant suite aux coupures électriques au niveau de l'éclairage public, de systèmes de signalisations et des infrastructures des réseaux d'assainissement et d'eau potable ont été relevés, de même que la téléphonie.</p> <p>Les émanations de monoxyde de carbone de groupes électrogènes ont également entraîné des problèmes de santé et des pertes humaines.</p>   |
| Chauffage urbain           | <p>Une vingtaine de bâtiments (à Asnières, Paris, Ivry, Ile-St-Denis, Boulogne-Billancourt...) reliés au chauffage urbain est sous haute surveillance à partir du 24 janvier. Quelques dysfonctionnements sont apparus à partir du 25 janvier.</p> <p>Il est annoncé qu'à 6,20 m, l'équivalent de 8000 logements serait privé de chaleur. La CPCU étudie alors la possibilité d'en secourir 50% grâce à des moyens de secours mobiles, selon les priorités suivantes : établissements de santé, écoles maternelles et crèches, établissements pour personnes âgées (EPHAD), immeubles de logements. Les bâtiments susceptibles d'être isolés du réseau de chaleur ont été approvisionnés préventivement de chaudières de remplacement. Des infiltrations de la nappe phréatique ont été observées au sein des installations de la CPCU, et des pompes ont été installées. Des livraisons de charbon supplémentaires ont dû être effectuées suite à l'insuffisance des autres sources de chaleur.</p> <p>Finalement, les bâtiments surveillés n'ont pas été privés de chauffage.</p> |   |
| Télécommunications         | Pas de données disponibles.   |   |
| Transports en commun       | <p>L'annonce de la fermeture prochaine du RER C dans Paris est faite le 21 janvier. La fermeture débute le 24 janvier entre Javel et Paris Austerlitz et entre Avenue Martin et Paris Austerlitz. Des pompages supplémentaires sont mis en place. La ligne 10 et le métro 63 sont renforcés en conséquence. L'impact de l'interruption du RER C sur le RER B à Saint-Michel (où les trains ne marquaient plus l'arrêt dans cette gare lors de la crue de 2016) n'a pas eu lieu car l'optimisation des procédures d'évacuation a été suffisante pour maintenir la gare ouverte malgré la fermeture de la sortie via le RER C. L'eau s'infiltré dans le métro, notamment à la station Pont Neuf. Les infiltrations sur la ligne 7 entraînent des soucis de signalisation et des retards sur la ligne, très perturbée.</p> <p>Le trafic du REC est interrompu le même jour et jusqu'au 26 entre Viroflay Rive Gauche et St Quentin en Yvelines, dans les deux sens de circulation. Il est annoncé le 27 que la fermeture intra-muros du</p>  | <p>Les impacts sur les déplacements ont été nombreux, notamment pour les déplacements domicile-travail en banlieue. Certains opérateurs ont dû s'organiser face aux difficultés de transports de certains de leurs salariés.</p> <p>La fermeture de la ligne 9, non annoncée et dont la gestion s'est faite de façon assez laborieuse, a entraîné des perturbations importantes auprès des usagers et la police a dû intervenir.</p> <p>Le chantier de la gare de Champigny centre (Grand Paris</p> |

|                |  |   |
|----------------|--|---|
|                | <p>RER C courra jusqu'au 31. Une centaine d'équipements électriques le long des voies est démontée. Le RER D est aussi sous surveillance dans le Val-de-Marne, la ligne R du Transilien en Seine-et-Marne et la ligne J dans les Yvelines. Des infiltrations continuent, notamment à la station Cité.</p> <p>De son côté, la RATP, en charge des lignes de métro et des RER A et B, a indiqué n'avoir rencontré « aucune perturbation significative sur son trafic » en lien avec la crue.</p> <p>Le 01 février la SNCF annonce que la réouverture du RER C n'aura lieu qu'à partir du 05 février. Un effondrement du talus du RER C entre St-Remy-Lès-Chevreuse et Gif-sur-Yvette a eu lieu. La partie Ouest de la ligne de métro 9, entre Porte de St Cloud et Pont de Sèvres est fermée, pour cause d'infiltrations. Une opération de pompage a été mise en place. Le 02 février, la date de réouverture du REC C est encore repoussée au 10 février, les infiltrations se multiplient.</p> | Express) a pris du retard car l'approvisionnement du béton depuis les centrales de fabrication a été ralenti.   |
| Réseau routier | <p>Le 5 janvier, les voies sur berges sont fermées. Certaines voies et tunnels sont fermés à la circulation piétonne, cycliste et automobile à partir du 18 janvier. Le 20 janvier, le tunnel des Tuileries et le souterrain Henri IV à Paris sont fermés, ainsi que la voie Mazas. La passerelle est en partie immergée le 21 janvier.</p> <p>Le 23 janvier, la voie Georges-Pompidou est interdite aux voitures, depuis le pont du Garigliano jusqu'au pont Bir-Hakeim. La Nationale 4, qui était coupée entre Jouy le Chatel et Vaudoy en Brie du fait des inondations est rouverte à la circulation.</p> <p>Les voies referment le 26 janvier. Les ponts Georges Pompidou, du Peccq, Fin d'Oise et de Poissy sont également fermés ce jour et rouvriront à partir du 31. Des routes départementales dans les Yvelines et le Val-de-Marne sont fermées, ainsi que l'A13 dans les Yvelines en raison de la présence d'une cuvette d'eau. Des échangeurs de l'A104 ont été fermés.</p>        | Les impacts sur les déplacements ont été nombreux, notamment pour les déplacements domicile-travail en banlieue. Certains opérateurs ont dû s'organiser face aux difficultés de transports de certains de leurs salariés. |
| Gaz            | <p>Des protections sont installées autour des installations aux environs du 25 janvier. Quelques centaines de logements sont coupées préventivement dès le 26 en Seine-et-Marne. Presque 800 abonnés sont coupés en gaz en Ile-de-France le 02 février, principalement dans le Val-de-Marne et les Yvelines.</p>   |   |
| Eau            | <p>Des protections mobiles ont été mises en place autour des installations des réseaux d'eau potable. L'eau a été rendue impropre à la consommation dans une douzaine de communes de Seine-et-Marne pendant plusieurs jours. Les traitements doivent être ajustés pour faire face à la dégradation de la qualité de la ressource, notamment par la pollution aux hydrocarbures. Des distributions de bouteilles d'eau ont été organisées. Eau de Paris indique que son service de distribution d'eau potable n'est pas et ne sera pas perturbé, et le Sedif assure que la qualité de l'eau distribuée n'est pas affectée.</p> <p>Les habitants de Thomery, en Seine-et-Marne, sont privés à la fois de gaz, d'électricité et d'eau potable pendant plusieurs jours. Chaque habitant a droit à trois bouteilles d'eau par jour.</p>   |   |

|                |  |  |
|----------------|--|--|
| Assainissement | <p>Une péniche devant livrer les réactifs à l'usine du SIAAP de traitement des eaux usées situées à Achères a été bloquée mais a finalement réussi à livrer le 24 janvier. Le SIAAP a mis en place un merlon pour protéger l'usine de prétraitement des eaux de Maisons-Laffitte.</p> <p>De nombreuses protections ont été installées sur l'ensemble des réseaux vulnérables, et des groupes électrogènes déployés. Des pompes supplémentaires ont été également mises en place pour absorber les flux supplémentaires. Des intrusions au sein du réseau sont observées en amont, et les capacités de délestage dans la Seine sont diminuées fortement du fait de son niveau.</p> <p>Au regard de la pluviométrie attendue le 31 janvier et le 01 février, il est annoncé que des débordements de réseaux (sur la voie publique et dans les habitations) pourraient survenir dans de nombreuses villes du Val-de-Marne, en particulier dans les villes situées en Rive droite de Marne. Quelques débordements et quelques rejets ont été observés.</p> | <p>La saturation du réseau d'assainissement a conduit à des débordements sur les chaussées et la fermeture de voies routières, et donc des difficultés de déplacement.</p> |
| Déchets        | <p>De nombreux déchets sont dragués par la Marne durant la crue, 2 bateaux à la dérive ont même été observés. Des parkings et des garages des camions à ordures ont été rendus inaccessibles car submergés, notamment à Meaux. Les rues de Villeneuve St Georges sont envahies d'une eau sombre, sale et pleine de débris.</p> <p>250 tonnes de déchets sont retenues au niveau du barrage de Méricourt à la fin de l'épisode de crue.</p>   | <p>La CPCU a été contrainte de se faire livrer du charbon supplémentaire pour compenser le manque de chaleur venant de l'incinération de déchets.</p>                      |



Figure 142 : L'effondrement du talus du RER C et les déchets bloqués au niveau du barrage de Méricourt. Source : (DDT Yvelines).

La CCR estime à près de 90 millions d'euros le coût de l'événement Seine-Marne dans son ensemble. Ce montant correspond uniquement aux dommages directs aux biens assurés via la garantie catastrophes naturelles et sur la base de la seule emprise au sol des zones inondées (CCR, 2018). Si le niveau de l'eau avait dépassé le seuil des 6,40 m à Paris, les dégâts notamment sur les réseaux et les infrastructures (non pris en compte par la CCR) auraient été beaucoup plus importants.

La crue a été l'occasion d'observer l'amélioration de la coordination et de la préparation des différents acteurs. Les collectivités ont semblé plus autonomes dans leur gestion de la crise également. La prise de conscience des parties prenantes est réelle, et celles-ci sont engagées sur la réduction de leur vulnérabilité.

Nous présentons ensuite dans le Tableau 27 les résultats de l'application de l'AMDE à l'analyse de ce retour d'expérience, en proposant de discuter ici du réseau de distribution d'électricité. Ce réseau a été sélectionné car il est central dans le fonctionnement urbain et car des éléments quantitatifs ont été partagés publiquement lors de l'épisode de crue de 2018.

Il apparaît que les informations nécessaires à l'application de ce formalisme pour pouvoir identifier de nouvelles connaissances ne sont pas disponibles en quantité suffisante. De plus, les impacts observés sont restés limités dans les zones centrales les plus urbanisées. Cette analyse pourrait théoriquement être complétée par des interviews avec des experts et des opérationnels impliqués dans la gestion de crise et la planification à l'époque, en utilisant ce même support formalisé commun de discussion pour les faire réagir et compléter les différentes catégories d'informations. Cependant, les interlocuteurs contactés à ce jour semblent peu enclins à partager des données quantitatives sur les impacts de la crue de 2018 (et de 2016) au niveau de l'agglomération parisienne. Les données récoltées proviennent plutôt des services de l'Etat et des médias, voire des remontées des communes.

Tableau 53 : Extrait de l'application de l'AMDE adaptée pour le cas du réseau de distribution d'électricité lors de la crue de janvier et février 2018.

| 5 janvier 2018  |                            |                       |                   |   |                                   |                    |  |   |  |  |
|-----------------|----------------------------|-----------------------|-------------------|---|-----------------------------------|--------------------|--|---|--|--|
| Service         | Réseau et sous-réseau      | Composant             | Quantité impactée | Zones   | Causes possibles (s)              | Quantité concernée | Défaillance  | Effets possibles (s)  | Quantité concernée bis                         | Zones bis  |
| Energie         | Electricité - Distribution | Poste source          | ?                 | Zones inondées                                  | Submersion                        | ?                  | Le poste source n'assure plus la distribution et la transformation d'électricité | Endommagement du poste source                                       | ?  | Postes submergés   |
|                 |                            |                       |                   | Zones inondées ou prévues d'être inondées       | Coupure préventive                | ?                  |  | Coupure d'alimentation au sein des postes de distribution connectés | Une centaine de postes de distribution         | Portions du réseau desservies par le poste source (si doublon coupé) |
|                 |                            |                       |                   | Toutes zones                                    | Délestage                         | ?                  |  | Coupure d'alimentation chez les clients connecté à la haute tension | ?  |  |
| Energie         | Electricité - Distribution | Poste de distribution | Une centaine      | Zones inondées et voisines                      | Submersion                        | ?                  | Le poste de distribution n'assure plus la distribution d'électricité             | Endommagement du poste de distribution                              | ?  | Postes submergés   |
|                 |                            |                       |                   | Essonne, Seine-et-Marne, Val-de-Marne, Yvelines | Coupure préventive                | ?                  |  | Coupure d'alimentation chez les clients                             | Environ 10 000 clients coupés en Ile-de-France | Clients connectés au poste de distribution                           |
|                 |                            |                       |                   |   | Coupure d'alimentation électrique | ?                  |  | Coupure d'alimentation pour les infrastructures des autres réseaux  | ?  | Infrastructures connectées au poste de distribution                  |
| 25 janvier 2018 |                            |                       |                   |   |                                   |                    |  |   |  |  |
| Service         | Réseau et sous-réseau      | Composant             | Quantité impactée | Zones   | Causes possibles (s)              | Quantité concernée | Défaillance  | Effets possibles (s)  | Quantité concernée bis                         | Zones bis  |
| Energie         | Electricité - Distribution | Poste source          | ?                 | Zones inondées                                  | Submersion                        | ?                  | Le poste source n'assure plus la distribution et la transformation d'électricité | Endommagement du poste source                                       | ?  | Postes submergés   |
|                 |                            |                       |                   | Zones inondées ou prévues d'être inondées       | Coupure préventive                | ?                  |  | Coupure d'alimentation au sein des postes de distribution connectés | Moins de dix                                   | Portions du réseau desservies par le poste source (si doublé coupé)  |
|                 |                            |                       |                   | Toutes zones                                    | Délestage                         | ?                  |  | Coupure d'alimentation chez les clients connecté à la haute tension | ?  |  |
| Energie         | Electricité - Distribution | Poste de distribution | Moins de dix      | Zones inondées et voisines                      | Submersion                        | ?                  | Le poste de distribution n'assure plus la distribution d'électricité             | Endommagement du poste de distribution                              | ?  | Postes submergés   |
|                 |                            |                       |                   | Yvelines  | Coupure préventive                | Moins de dix       |  | Coupure d'alimentation chez les clients                             | Environ 500 clients coupés                     | Clients connectés au poste de distribution dans les Yvelines         |
|                 |                            |                       |                   |   | Coupure d'alimentation électrique |                    |  | Coupure d'alimentation pour les infrastructures des autres réseaux  | ?  | Infrastructures connectées au poste de distribution                  |

27 janvier 2018

| Service | Réseau et sous-réseau      | Composant             | Quantité impactée | Zones  | Causes possibles (s)              | Quantité concernée | Défaillance  | Effets possibles (s)  | Quantité concernée bis      | Zones bis  |
|---------|----------------------------|-----------------------|-------------------|--|-----------------------------------|--------------------|--|---|-----------------------------|--|
| Energie | Electricité - Distribution | Poste source          | ?                 | Zones inondées                                     | Submersion                        | ?                  | Le poste source n'assure plus la distribution et la transformation d'électricité | Endommagement du poste source                                       | ?                           | Postes submergés   |
|         |                            |                       |                   | Zones inondées ou prévues d'être inondées          | Coupure préventive                | ?                  |  | Coupure d'alimentation au sein des postes de distribution connectés | Une quinzaine               | Portions du réseau desservies par le poste source (si doublé coupé)                |
|         |                            |                       |                   | Toutes zones                                       | Délestage                         | ?                  |  | Coupure d'alimentation chez les clients connecté à la haute tension | ?                           |  |
| Energie | Electricité - Distribution | Poste de distribution | Une quinzaine     | Zones inondées et voisines                         | Submersion                        | ?                  | Le poste de distribution n'assure plus la distribution d'électricité             | Endommagement du poste de distribution                              | ?                           | Postes submergés   |
|         |                            |                       |                   | Yvelines principalement, mais aussi Seine-et-Marne | Coupure préventive                | ?                  |  | Coupure d'alimentation chez les clients                             | Environ 1200 clients coupés | Clients connectés au poste de distribution, dans les Yvelines et la Seine-et-Marne |
|         |                            |                       |                   |  | Coupure d'alimentation électrique | ?                  |  | Coupure d'alimentation pour les infrastructures des autres réseaux  | ?                           | Infrastructures connectées au poste de distribution                                |

29 janvier 2018

| Service | Réseau et sous-réseau      | Composant             | Quantité impactée | Zones                                     | Causes possibles (s) | Quantité concernée | Défaillance  | Effets possibles (s)  | Quantité concernée bis      | Zones bis  |
|---------|----------------------------|-----------------------|-------------------|---|----------------------|--------------------|--|---|-----------------------------|--|
| Energie | Electricité - Distribution | Poste source          | ?                 | Zones inondées                            | Submersion           | ?                  | Le poste source n'assure plus la distribution et la transformation d'électricité | Endommagement du poste source                                       | ?                           | Postes submergés   |
|         |                            |                       |                   | Zones inondées ou prévues d'être inondées | Coupure préventive   | ?                  |  | Coupure d'alimentation au sein des postes de distribution connectés | Moins de vingt              | Portions du réseau desservies par le poste source (si doublé coupé)          |
|         |                            |                       |                   | Toutes zones                              | Délestage            | ?                  |  | Coupure d'alimentation chez les clients connecté à la haute tension |                             |  |
| Energie | Electricité - Distribution | Poste de distribution | Moins de vingt    | Zones inondées et voisines                | Submersion           | ?                  | Le poste de distribution n'assure plus la distribution d'électricité             | Endommagement du poste de distribution                              | ?                           | Postes submergés   |
|         |                            |                       |                   | Yvelines                                  | Coupure préventive   | ?                  |  | Coupure d'alimentation chez les clients                             | Environ 2000 clients coupés | Clients connectés au poste de distribution, dans les Yvelines principalement |

|                 |                            |                       |                   |   | Coupure d'alimentation électrique | ?                  |  | Coupure d'alimentation pour les infrastructures des autres réseaux  | ?                                   | Infrastructures connectées au poste de distribution  |
|-----------------|----------------------------|-----------------------|-------------------|---|-----------------------------------|--------------------|--|---|-------------------------------------|--|
| 01 février 2018 |                            |                       |                   |   |                                   |                    |  |   |                                     |  |
| Service         | Réseau et sous-réseau      | Composant             | Quantité impactée | Zones                                     | Causes possibles (s)              | Quantité concernée | Défaillance  | Effets possibles (s)  | Quantité concernée bis              | Zones bis  |
| Energie         | Electricité - Distribution | Poste source          | ?                 | Zones inondées                            | Submersion                        | ?                  | Le poste source n'assure plus la distribution et la transformation d'électricité | Endommagement du poste source                                       | ?                                   | Postes submergés   |
|                 |                            |                       |                   | Zones inondées ou prévues d'être inondées | Coupure préventive                | ?                  |  | Coupure d'alimentation au sein des postes de distribution connectés | Une quinzaine                       | Portions du réseau desservi par le poste source (si doublé coupé)  |
|                 |                            |                       |                   | Toutes zones                              | Délestage                         | ?                  |  | Coupure d'alimentation chez les clients connecté à la haute tension | Au moins un client HT coupé à Paris | Yvelines, Seine-St-Denis et Val-de-Marne principalement  |
| Energie         | Electricité - Distribution | Poste de distribution | Une quinzaine     | Zones inondées et voisines Yvelines       | Submersion                        | ?                  | Le poste de distribution n'assure plus la distribution d'électricité             | Endommagement du poste de distribution                              | ?                                   | Postes submergés   |
|                 |                            |                       |                   |   | Coupure préventive                | ?                  |  | Coupure d'alimentation chez les clients                             | Environ 1500 clients coupés         | Clients connectés au poste de distribution, dans les Yvelines, la Seine-St-Denis et le Val-de-Marne principalement |
|                 |                            |                       |                   |   | Coupure d'alimentation électrique | ?                  |  | Coupure d'alimentation pour les infrastructures des autres réseaux  | ?                                   | Infrastructures connectées au poste de distribution  |

#### 9.2.4. Enseignements et comparaisons

Il apparaît que les cinétiques ont été très différentes entre les deux épisodes de crue étudiés. La cinétique de 2018 a par exemple consisté en une montée des eaux sur plusieurs semaines, avec des phases de décrue et de recrue, et une dynamique décalée selon les zones géographiques. Ces deux retours d'expérience permettent de mettre en exergue certains liens de dépendance avérés entre les réseaux techniques urbains et leurs conséquences sous forme de cascades. Les réseaux de distribution d'électricité, de transports (ferré ou voirie) et d'assainissement ressortent comme étant ceux ayant provoqué des coupures au sein d'autres réseaux par le biais de dépendances. Les défaillances en cascade documentées sont cependant relativement peu nombreuses et n'ont pas touché l'ensemble des réseaux durant les deux événements étudiés, ce qui peut être expliqué par deux considérations :

- Les niveaux d'eau atteints dans les points les plus sensibles et scrutés de l'agglomération étaient inférieurs aux seuils critiques où les réseaux commencent à tomber les uns après les autres. Des actions de mise à l'abri et de coupures préventives ont cependant été instaurées avant que les seuils définis soient atteints.
- Ces phénomènes sont très peu documentés, les informations étant plutôt concentrées sur la quantification des impacts finaux que sur les causes des défaillances les ayant provoqués.
- Ces retours d'expérience ne permettent donc pas d'introduire de réels éléments de connaissance nouveaux, car les impacts n'ont pas été très importants et que les données relatives ne sont généralement pas disponibles.

Concernant les évolutions constatées entre l'épisode de 2016 et de 2018, les répondants estiment que les impacts ont été moins importants en 2018, notamment du fait de la cinétique de la crue. De plus, une amélioration des procédures et de l'organisation de crise a été soulignée par la majorité des répondants, que ce soit en interne ou dans les échanges au sein du groupe des parties prenantes.

### 9.3. LE COUPLAGE DE CARTOGRAPHIES SECTORIELLES

Des propositions portant sur les cartographies semblent pertinentes dans le sens où ce moyen d'échange et de travail est déjà utilisé parmi les opérateurs de réseaux franciliens et qu'il semble incarner un vecteur potentiel d'avancées opérationnelles. L'objectif est alors de contourner les limites soulevées précédemment et illustrées notamment par les travaux de Toubin (2014) concernant la difficulté de modéliser finement des processus complexes, divers, multiples, évolutifs regroupant de nombreux acteurs. Les parties prenantes sont désormais convaincues de la nécessité de mener une réflexion commune sur la question des (inter)dépendances et des défaillances en cascade induites. Il ressort par ailleurs de l'enquête que la plateforme de partage est un outil qui a du potentiel si les parties prenantes s'en saisissent vraiment et utilisent de façon organisée les informations partagées dans leurs travaux et études portant sur les impacts de la crue.

Les limites de l'utilisation actuelle des cartographies de vulnérabilité par le biais de la plateforme collaborative hébergée sur Alfresco sont tout d'abord présentées. Un protocole commun de construction, de partage et de prise en compte de ces cartographies est ensuite proposé.



### 9.3.1. Les limites actuelles

Nous présentons ici les conclusions de nos observations concernant la construction et l'utilisation actuelle des cartographies de vulnérabilité face à la crue. Les informations partagées sur la plateforme étant confidentielles, nous discuterons ici des modalités de construction des cartes et non des cartes en elles-mêmes. Les opérateurs ayant partagé des informations au moment de l'enquête étaient les suivants :

- Le SIAAP et les conseils départementaux du 92, 93 et 94 pour leur compétence en matière d'assainissement
- EAU DE PARIS
- VEDIF, structure rattachée à Véolia et délégataire du Sedif, et VEOLIA
- ENEDIS (Paris et les directions Ile-de-France)
- GRDF
- La CPCU
- La DRIEA pour leur compétence en matière de réseau routier
- La RATP et la SNCF
- Les opérateurs Orange ; Bouygues et SFR sous forme combinée (à la fin de la période d'enquête)

Pour faciliter la compréhension des propos suivants, la Figure 143 est un exemple de représentation cartographique des scénarios d'inondation R1.0 et R1.15, associés aux perturbations engendrées sur le réseau de transports en commun de la RATP. Ces informations ont été mises en forme à partir des informations contenues dans les fichiers cartographiques de vulnérabilité de cet opérateur, partagés sur la plateforme collaborative.

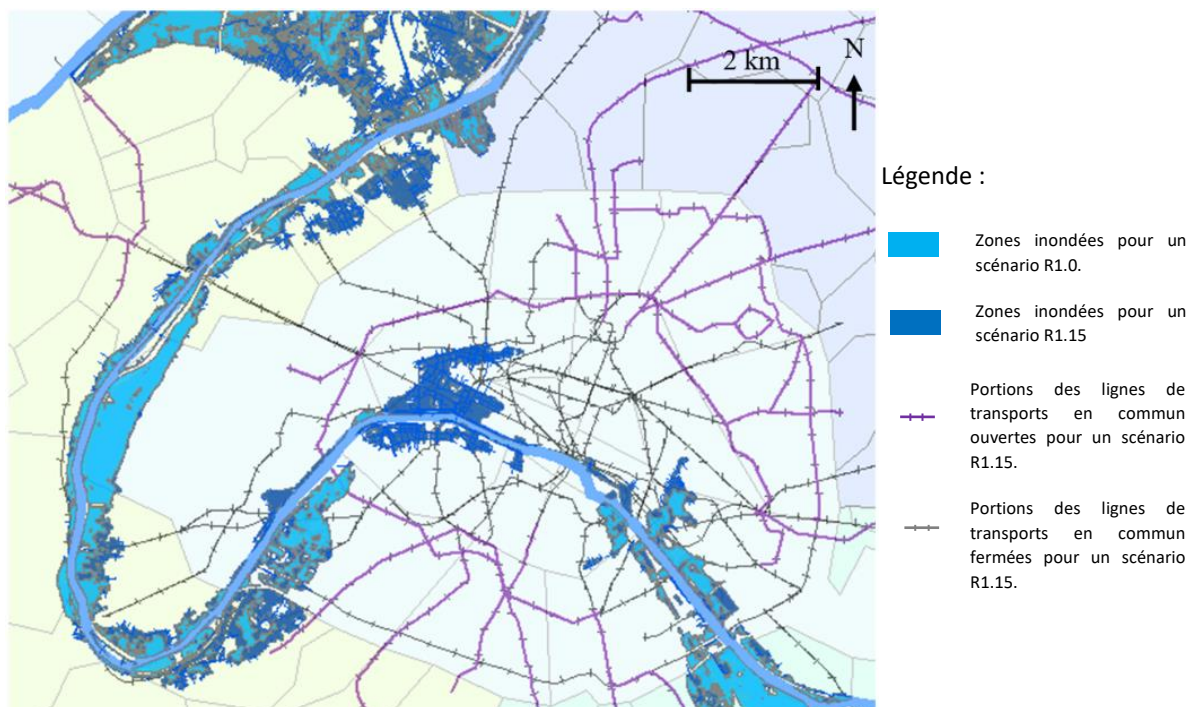


Figure 143 : Représentation cartographique des scénarios d'inondation R1.0 et R1.15, et des perturbations engendrées sur le réseau de transports en commun.

### 9.3.1.1. Des incohérences dans la notion de vulnérabilité

L'enquête a tout d'abord permis de révéler que les répondants ne partagent pas une définition commune et arrêtée des zones de « vulnérabilité » définies pour chaque scénario DRIEE, dont la notion a été proposée par la DRIEE et la Zone de Défense et de Sécurité lors de la construction de la plateforme (Bocquentin et al., 2020). La diversité de définitions utilisée est reprise dans le Tableau 54. En effet, certains considèrent que celles-ci correspondent aux zones inondées, d'autres aux zones qui seraient potentiellement coupées pour un scénario donné, d'autres aux zones qu'ils couperaient préventivement lors de l'annonce d'un scénario donné, ou encore les zones au sein desquelles le service serait perturbé, etc.

Finalement, les cartographies peuvent correspondre à des zones dans lesquelles :

- Les installations du réseau sont exposées
- Les installations du réseau sont exposées et vulnérables
- Les installations du réseau sont non exposées mais vulnérables
- Le service est coupé préventivement
- Le service est défaillant

Cette diversité de conception des zones de « vulnérabilité », qui finalement correspondent rarement à des vulnérabilités, peut entraîner une incohérence dans le partage de ces informations et les travaux effectués à partir de celles-ci.

Tableau 54 : Définitions de "zone de vulnérabilité" utilisées par les opérateurs.

|                      | Définitions d'une "zone de vulnérabilité"   |
|----------------------|---|
| Enedis (IFO + Paris) | Zone géographique où l'électricité peut potentiellement être coupée, appelée également "zone de fragilité électrique"   |
| GDRF                 | Zone géographique où des clients peuvent être inondés ou impactés. Des clients peuvent être coupés s'ils sont raccordés à une partie de réseau inondée.                   |
| RATP                 | Zone inondable au sein de laquelle se trouve un enjeu pour la continuité d'activité   |
| SIAAP                | Zone de débordement potentiel par le réseau d'assainissement, et/ou de dysfonctionnement du réseau d'assainissement   |
| SFR                  | Zone comportant des éléments composant le réseau et située en zone inondable et/ou en zone privée d'électricité et/ou inaccessible en raison des inondations              |
| SNCF                 | Zone au sein de laquelle le patrimoine peut être impacté  |
| SEDIF                | Territoire touché directement ou indirectement par l'aléa inondation à partir d'un certain seuil, à partir duquel le service public de l'eau ne pourrait plus être assuré |
| CPCU                 | Zone incluse dans les cartes ZIP, avec présence d'infrastructures CPCU  |
| EdP                  | Zones (à Paris) qui ne seraient plus alimentées en eau potable pour un scénario de crue donné, avec des hypothèses de travail données.                                    |
| VEOLIA               | Zone où le service de distribution d'eau pourrait potentiellement être affecté et ne plus être délivré  |

### 9.3.1.2. Une diversité de méthodologies pour le calcul des zones de « vulnérabilité »

Face aux constats exposés ci-dessus, nous avons pu interroger les répondants au sujet des méthodologies de construction des cartographies partagées. Ils s'avèrent qu'elles sont également diverses et non partagées, comme le montre la Figure 144. La majorité des répondants travaille à partir de la superposition des scénarios DRIEE statiques avec les cartographies de leurs infrastructures. L'approche utilisée est souvent statique : pour chaque carte de « vulnérabilité » produite, un travail d'évaluation a été réalisé pour un scénario de crue donné et les informations correspondant à des niveaux intermédiaires ne sont pas connues ou en tout cas pas formalisées. On note cependant que certains opérateurs utilisent une modélisation de l'aléa développée en interne et propre à leur réseau, et pas seulement les scénarios statiques de crue qui comprennent certaines hypothèses. Cela est d'ailleurs lié à l'arrivée progressive de modélisations dynamiques de l'état du réseau qui sont actuellement en cours d'élaboration pour plusieurs opérateurs.

Pour identifier les zones impactées, la majorité des répondants ne réalise pas de modélisation physique du réseau et des perturbations en son sein mais se base sur les données de position et d'altitude des infrastructures. Certains utilisent également des informations concernant la sensibilité aux inondations pour identifier celles qui seraient réellement impactées et pas seulement exposées, comme nous l'avons vu précédemment. Quelques opérateurs tiennent également compte de paramètres plus organisationnels comme les protections mises en place ou les réorganisations du réseau envisageables. Certains utilisent alors un système de zonage autour de points potentiellement défaillants, comme Enedis par exemple.

#### *Quels types de modélisations utilisez-vous pour construire les cartographies de vulnérabilités de votre réseau ?*

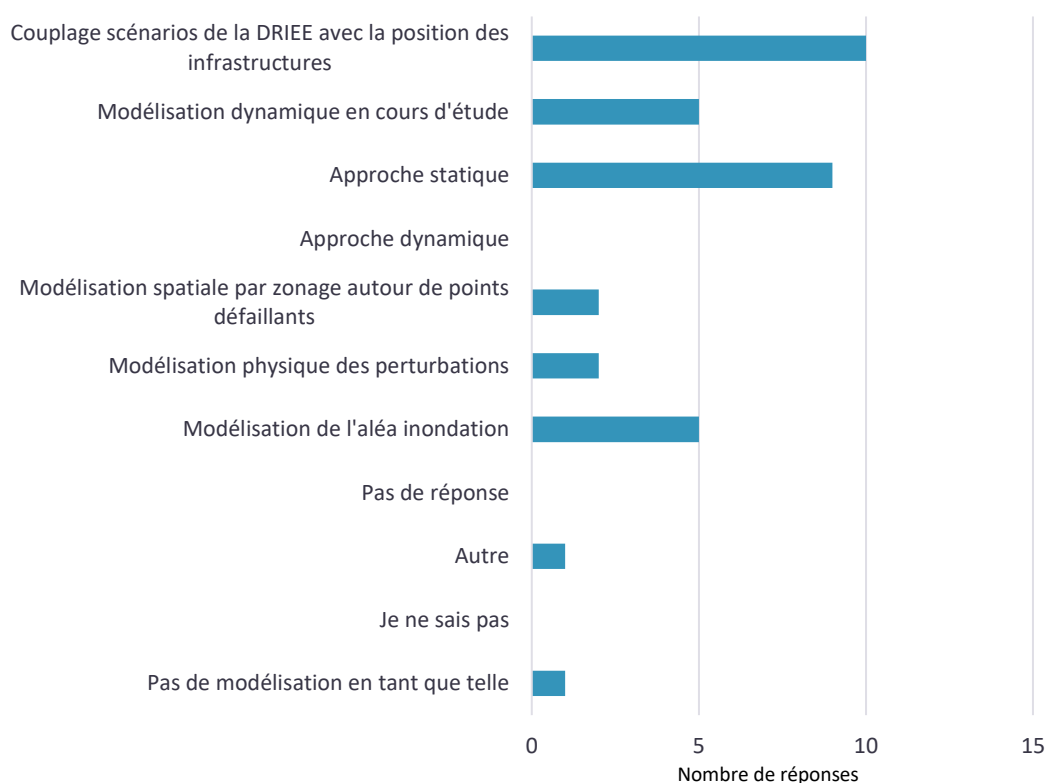


Figure 144 : Les types de modélisations utilisées pour construire les cartographies de vulnérabilité.

La Figure 145 souligne que les résultats de ces travaux et études sont principalement des cartographies non dynamiques des zones impactées par hauteur d'eau, ainsi que les listes des infrastructures situées au sein de ces zones pour chacune des cartographies. Certains opérateurs relient directement les infrastructures impactées aux clients et abonnés reliés à celles-ci.

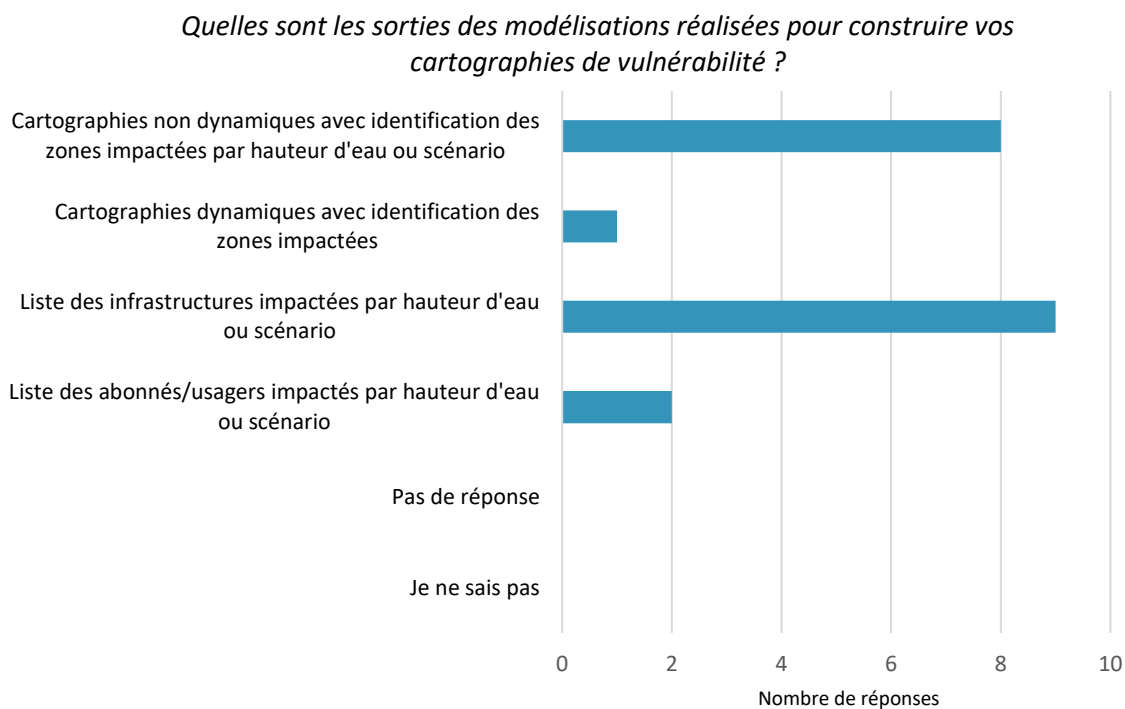


Figure 145 : Les sorties des modélisations réalisées pour construire les cartographies de vulnérabilité.

### 9.3.1.3. Une hétérogénéité des données mises à contribution et des formats de représentation des résultats obtenus

Les données utilisées par les opérateurs pour la construction de ces cartographies posent également question, notamment car elles ne sont jamais clairement explicitées. Certains opérateurs se basent sur les positions géographiques de leurs infrastructures seules, d'autres sur les hauteurs également, d'autres encore prennent aussi en compte des informations relatives aux protections en place, aux vulnérabilités par rapport à la présence de l'eau, etc. Concernant les hauteurs, l'utilisation des ZIP (calculées avec une comparaison entre l'altitude maximale de l'eau et l'altitude du sol) simplifie la considération des voiries et des accès aux bâtiments mais complexifie la considération de l'état inondé ou non d'autres éléments positionnés à d'autres hauteurs.

Les périmètres considérés sont également très variés, car la gestion de ces réseaux ne correspond à aucune échelle administrative comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, qu'un même réseau peut être géré par plusieurs opérateurs, et que le périmètre d'un réseau ne correspond quasiment jamais à celui d'un autre. Certains opérateurs ne considèrent pas l'ensemble de leur périmètre d'action dans les cartes, ce qui peut poser question. Les scénarios de crue considérés sont également variés, et certains opérateurs comme la CPCU ne tiennent d'ailleurs pas compte des scénarios DRIEE. De même, il n'est pas explicité si les solutions palliatives prévues sont déjà prises en compte dans ces estimations, alors qu'elles peuvent considérablement modifier l'état du service. Un autre point à souligner est que les dépendances identifiées grâce à des études et processus complémentaires ne sont qu'en partie (voire pas du tout) prises en compte dans la construction de ces

cartographies de vulnérabilité. Les vulnérabilités « externes » les plus prises en compte dans la construction des cartographies de vulnérabilité sont celles correspondant à l'électricité et au réseau routier. Ce qui signifie que les vulnérabilités communiquées peuvent ne pas correspondre à la réalité des fonctionnements interdépendants de ces réseaux, mais surtout que les différentes parties prenantes ne savent pas quelles sont les hypothèses de construction de ces cartographies. On observe en effet l'absence de trame méthodologique partagée concernant les hypothèses et les paramètres à prendre en compte. La Figure 146 reprend des extraits de 4 cartographies réelles partagées sur la plateforme, qui permettent de réaliser que les « vulnérabilités » sont représentées de façons très diverses.

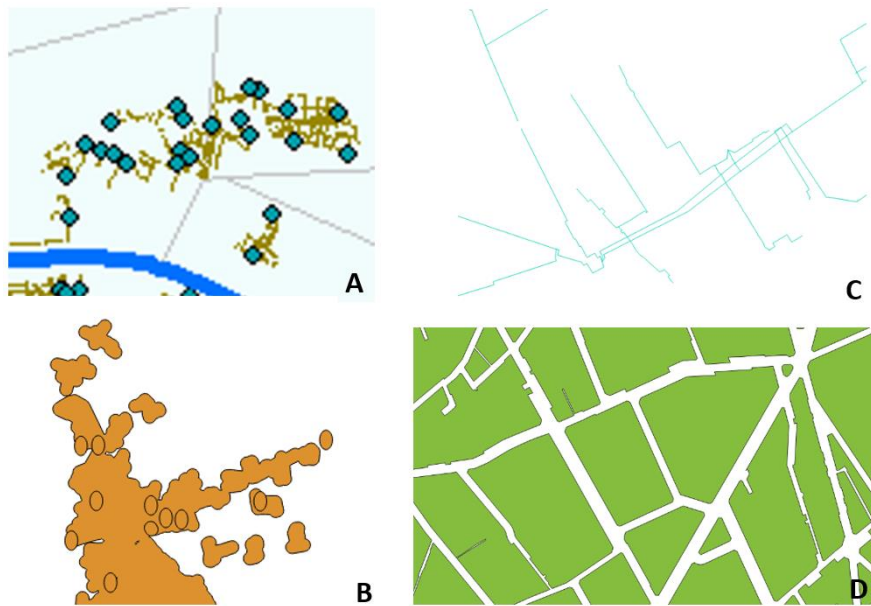


Figure 146 : Exemples de représentations utilisées pour cartographier les vulnérabilités des réseaux : infrastructures coupées (A), buffers autour d'infrastructures coupées (B), linéaires de réseaux coupés (C), îlots coupés (D)...

Ces « vulnérabilités » peuvent être représentées sous forme d'infrastructures coupées (cf. Figure 49A), de buffers autour d'infrastructures coupées (cf. Figure 49B), de linéaires de réseaux coupés (cf. Figure 49C), ou même d'îlots coupés (cf. Figure 49D). Concernant les formats des données, certaines cartes sont même partagées uniquement sous format .pdf et non sous format SIG.

Il apparaît que les personnes ou les services en charge de la création et mise à jour de ces cartes peuvent être soit des services informatiques, des services spécialisés en SIG, ou des responsables du sujet de la maîtrise des risques voire de l'inondation ce qui peut entraîner des divergences dans la façon dont elles sont construites. Les processus de mise à jour des cartographies en interne diffèrent également selon les structures, certains étant cycliques et organisés et d'autres ponctuels selon les événements. Il est intéressant de noter que certains gestionnaires ne prévoient pas de mise à jour de leurs cartographies sur la plateforme d'échanges. Et l'ajout par d'autres gestionnaires de nouvelles cartes ou de cartes mises à jour sur cette plateforme n'entraîne pas automatiquement une mise à jour de leur propre cartographie en interne, et encore moins souvent une mise à jour des cartographies qu'ils partagent sur la plateforme Alfresco. Plusieurs répondants utilisent cependant des données relatives aux vulnérabilités de certains réseaux plus précises que celles contenues dans les cartographies partagées. On pense notamment aux vulnérabilités par bâtiment que peut estimer Enedis sur demande. Cela démontre d'ailleurs que des échanges bilatéraux prennent place entre certains acteurs, en dehors des échanges formalisés et organisés.

Le Tableau 55 synthétise et souligne l'hétérogénéité des cartographies analysées. On précise que les cartes concernant les télécommunications n'ont pas pu être consultées au moment de l'analyse.

Tableau 55 : Caractéristiques des cartographies de vulnérabilités partagées en janvier 2019.

| Réseau               | Opérateur                       | Périmètre d'action  | Périmètre considéré  | Scénarios considérés   | Type de données  | Format de représentation                        |
|----------------------|---------------------------------|---|--|--|--|---|
| Assainissement       | SIAAP                           | Hauts-de-Seine, Paris, Seine-St-Denis, Val-de-Marne + 180 communes Val-d'Oise, de l'Essonne, des Yvelines et de la Seine-et-Marne | Son réseau   | R100   | Linéaires vulnérables à des débordements et défaillances | Linéaire  |
|                      | CD 92/93                        | 92 (et limites 93)  | 93 (et limites 93)   | R060, R070, R080, R090, R100, R115   | Surfaces alimentées par réseau vulnérable                | Surfacique                                      |
|                      | CD94                            | 94  | 94   | R060, R080, R100   | Surfaces alimentées par réseau vulnérable                | Surfacique                                      |
| Eau                  | EAU DE PARIS                    | Paris   | Paris  | R115 (rien avant selon hypothèses)   | Surfaces d'îlots non alimentés                           | Surfacique                                      |
|                      | VEDIF                           | Certaines communes de Seine-St-Denis, du Val-de-Marne, des Hauts-de-Seine, du Val d'Oise, de Seine-et-Marne...                    | Certaines communes de Seine-St-Denis, du Val-de-Marne, des Hauts-de-Seine, du Val d'Oise, de Seine-et-Marne... | R115   | Communes "Eau d'ultime secours"                          | ?   |
|                      | VEOLIA                          | Certaines communes de Seine-St-Denis, du Val-de-Marne, des Yvelines, du Val d'Oise, de Seine-et-Marne...                          | Certaines communes de Seine-St-Denis, du Val-de-Marne, des Yvelines, du Val d'Oise, de Seine-et-Marne...       | R080, R100, R115   | Communes "Eau dégradée"                                  | ?   |
| Electricité          | ENEDIS                          | Ile-de-France   | Ile-de-France  | R060, R080, R100, R115   | Surfaces buffer autour des postes fragiles               | Surfacique                                      |
| Gaz                  | GRDF                            | Ile-de-France   | Paris et petite couronne ?   | R060, R080, R100, R115   | Postes et linéaires inondés ou impactés                  | Linéaire pour zones disponibles mais le reste ? |
| Fluides calorifiques | CPCU                            | Paris et quelques extensions  | Paris et quelques zones extérieures  | Hauteurs d'eau : 5.8, 6.2, 6.31 (070), 6.5, 6.88 (080), 7.19 (085), 7.58 (090), 8.12 (100), 8.43 (105) | Linéaires vulnérables (submersion et 5°C)                | Linéaire mais quels scénarios ?                 |
| Routes               | DRIEA                           | Ile-de-France   | Ile-de-France  | R005, R055, R060, R070, R080, R085, R090, R100, R105, R115   | Voiries submergées                                       | Linéaire  |
| Transports en commun | RATP                            | Ile-de-France   | Ile-de-France  | R070, R080, R090, R100, R115   | Stations et linéaires coupées préventivement             | Ponctuel ou surface de rabattement ?            |
|                      | SNCF                            | Ile-de-France   | Ile-de-France  | R060, R080, R100, R115   | Stations et linéaires potentiellement impactées          | Ponctuel ou surface de rabattement ?            |
| Télécommunications   | COMBINE (Orange, Bouygues, SFR) | Ile-de-France   | Ile-de-France  | ?  | ?  | ?   |

### 9.3.1.5. De nombreuses incertitudes

Les incertitudes relatives à ces cartographies, qu'elles soient structurelles ou résiduelles, posent alors question. Il est précisé que ces cartographies sont en effet prévues pour une utilisation à l'échelle régionale et départementale, et ce à des seules fins « d'évaluer les moyens matériels et humains à mettre en œuvre ». Une utilisation intra-communale est d'ailleurs déconseillée par certains opérateurs du fait des incertitudes existantes.

L'utilisation des zones ZIP-ZICH pour la construction des cartographies de vulnérabilités pose tout d'abord la question de la validité et des hypothèses de construction de celles-ci, notamment en rapport avec la non prise en compte des protections et batardeaux, ainsi que des pompages, qui seraient mis en place alors même que la majorité des opérateurs ne s'appuient que sur des données de position. Des incertitudes relatives aux modélisations hydrauliques et au modèle numérique de terrain utilisé pour la construction de scénarios demeurent également. Des incertitudes concernant les données et les méthodologies utilisées pour estimer les vulnérabilités des infrastructures ou des zones impactées existent également, mais ne sont jamais mentionnées.

Des imprécisions peuvent également exister lors de la représentation cartographique des résultats, mais ne sont jamais explicitées. Prenons par exemple le cas de la représentation des vulnérabilités d'un réseau sous forme surfacique. Un client situé dans une zone de vulnérabilité peut potentiellement continuer à être alimenté lors d'une crue, si ce client est en fait raccordé à un câble ou une canalisation différente de celui ou celle vulnérable. En effet, les méthodes de buffers, les redondances existantes, et des approximations dans les connexions entre le réseau et les clients peuvent amener à ce type d'incertitudes, comme illustré dans la Figure 144 et dans la Figure 148.

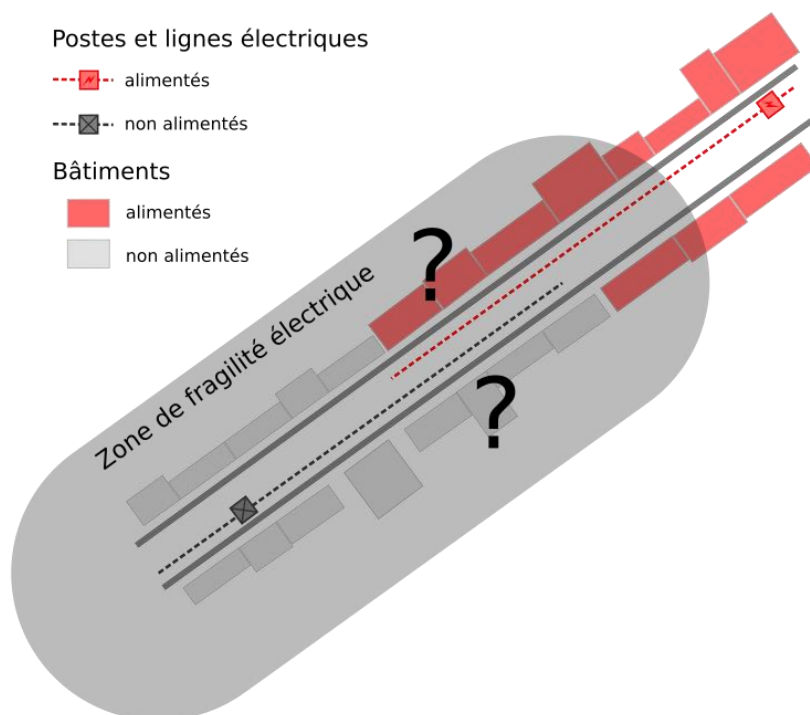


Figure 147 : Les imprécisions de la cartographie des zones de fragilité électrique, dues à la présence potentielle de plusieurs lignes électriques. Source : (Cochery, 2019).

De la même façon, un client situé en dehors d'une zone de vulnérabilité peut potentiellement être coupé lors d'une crue car il est situé à proximité d'une zone de fragilité (et est raccordé à un câble ou une canalisation concerné(e) par la vulnérabilité) ou suite à un événement non prévu comme l'inondation

de zones plus étendues que celles modélisées (la coupure pouvant alors être préventive ou accidentelle).

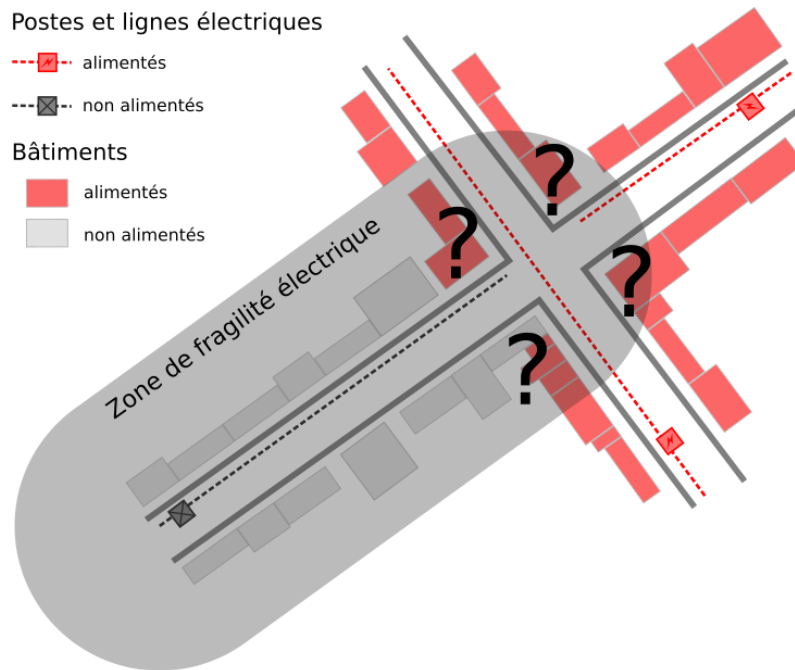


Figure 148 : Les incertitudes concernant les coupures électriques estimées d'après les zones de fragilité électriques aux intersections routières. Source : (Cochery, 2019).

### 9.3.1.6. Bilan des sources d'incohérence

La Figure 149 synthétise les différentes observations faites concernant les incohérences potentielles au niveau des données d'entrée, de la construction des cartes, des résultats obtenus et de l'utilisation de ces résultats.

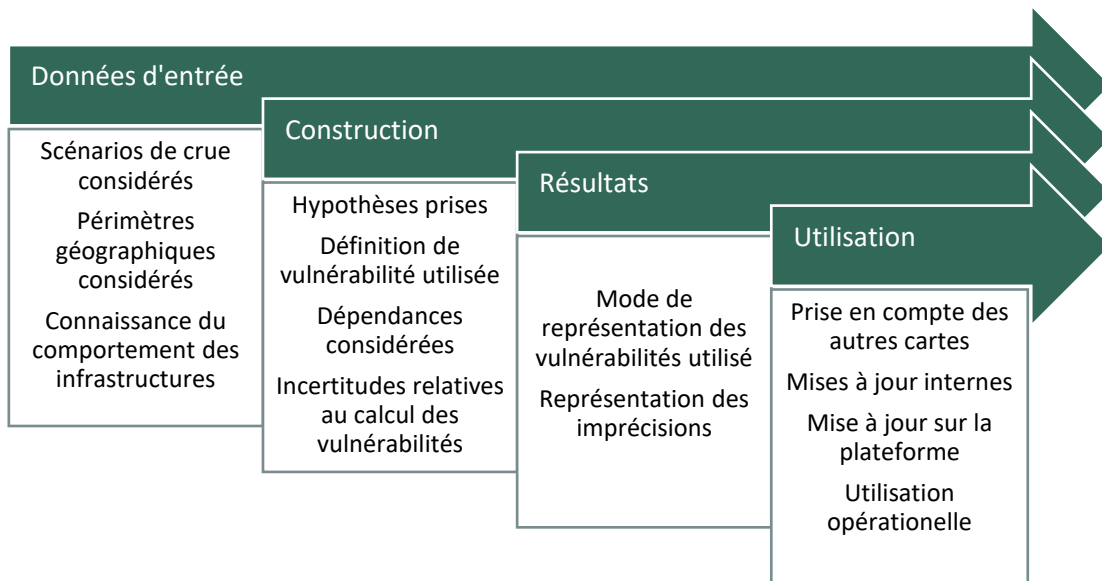


Figure 149 : Synthèse des incohérences potentielles dans la construction et l'utilisation des cartographies.



À la suite des observations et du bilan réalisé, nous proposons finalement un protocole commun pour la construction, le partage et l'utilisation des cartographies dans le cadre de la plateforme d'échanges collaborative.

Une méthodologie commune permettrait en effet la prise en compte des vulnérabilités externes des opérateurs (c'est-à-dire les dépendances), et donc des potentiels effets cascade découlant des vulnérabilités des différents réseaux.

### 9.3.2. Proposition d'un protocole commun

#### 9.3.2.1. Mise en œuvre d'un diagnostic systématique

Avant l'application d'un protocole commun, la première étape serait un diagnostic détaillé pour chaque opérateur et chaque cartographie existante, pouvant notamment s'appuyer sur une grille d'analyse telle que celle présentée ci-dessous. Cette grille permettrait d'établir de façon rigoureuse les périmètres étudiés, les formes de représentations des « vulnérabilités » utilisées et leur signification, les méthodes de calcul ou d'identification de celles-ci, les dépendances prises en compte et les incertitudes existantes.

- Périmètre : Quel est le périmètre géographique de la cartographie ?
- Forme des vulnérabilités : Quel est le format utilisé pour la représentation des vulnérabilités (lignes, points, buffers, zones...) ?
- Signification des vulnérabilités : Quelle définition de vulnérabilité est utilisée pour la cartographie (zones inondées, zones potentiellement coupées pour un scénario donné, zones coupées préventivement lors de l'annonce d'un scénario donné...) ?
- Calcul des vulnérabilités : Quelles est la méthode de calcul ou d'identification des vulnérabilités (superposition des scénarios DRIEE et des positions géographiques des infrastructures, modélisation physique des perturbations, modélisation de l'aléa inondation, modélisation spatiale par zonage autour de points défaillants...) utilisée pour la construction de la cartographie ?
- Dépendances prises en compte : Quelles sont les dépendances entrantes prises en compte pour la construction de la cartographie, c'est-à-dire quelles cartographies correspondant aux vulnérabilités de réseaux auxquels le réseau est dépendant ont été utilisées pour la construction de la cartographie ?
- Incertitudes : Comment sont gérées et indiquées les incertitudes relatives à la cartographie (résiduelles) et à sa construction (structurelles) ?

Après la réalisation de ce diagnostic et l'analyse des résultats obtenus, une méthodologie commune de création des cartographies de vulnérabilités pourrait être construite avec les acteurs concernés, selon les pratiques actuelles et les possibilités techniques et organisationnelles.

#### 9.3.2.2. Définition d'un cadre partagé

Un cadre clair commun et opérationnel précisant les tenants et aboutissants de ce type de cartographie doit tout d'abord être arrêté et partagé par toutes les parties prenantes, notamment

pour la définition commune de la notion cartographiée, le processus de construction des cartes et les conditions d'utilisation et de mise à jour de celles-ci.

#### *Une définition commune de la notion de fragilité*

Le terme de « zone de vulnérabilité », dont les interprétations sont nombreuses, pourrait être remplacé par exemple par « zone de fragilité », utilisée par Enedis aujourd'hui. La définition pourrait être la suivante : « Les zones de fragilité correspondent aux zones au sein desquelles le service est susceptible d'être défaillant pour un scénario de crue donné, que ce soit du fait de vulnérabilités internes ou du fait de vulnérabilités externes liées aux dépendances à d'autres services urbains. » Les cartes d'un réseau donné représenteraient ainsi pour chaque scénario de la DRIEE les zones où le service serait probablement perturbé du fait de l'inondation ou du fait de la coupure de services urbains dont il est dépendant.

#### *Un cadre de construction des cartographies*

Un cadre comportant des consignes concernant les scénarios à considérer, les données à prendre en compte, les hypothèses à émettre, les méthodes d'évaluation des vulnérabilités à appliquer serait utile à la mise en cohérence des cartographies. Une homogénéité parfaite n'est cependant pas envisageable pour des réseaux tellement divers.

Par exemple, on ne peut représenter les fragilités de tous les réseaux de la même façon. La zone d'impact de la fermeture d'une station de métro ne peut être déterminée de façon précise tandis que la zone d'impact de la coupure d'un poste source électrique peut l'être du fait de la connaissance du maillage du réseau et des connexions aux postes de distribution. Les réseaux, dont les zones de fragilité peuvent être représentées sous forme de buffers, sont : la distribution d'électricité, les télécommunications, le chauffage urbain, l'assainissement, l'eau potable, la distribution de gaz. Les réseaux dont les zones de fragilité ne peuvent être représentées sous forme de buffer sont les transports ferrés, le réseau routier.

Nous proposons dans le Tableau 56 une notice explicative que les opérateurs pourraient renseigner lors du partage des cartes sur la plateforme collaborative. Les opérateurs seraient invités à la remplir et à cocher les éléments correspondant à la carte mise en ligne. Cette notice permettrait ainsi d'explicitier les modalités de construction des cartes partagées mais aussi de sensibiliser les opérateurs à la recherche d'une homogénéité et d'une cohérence globale. Elle caractérise le périmètre, la forme des fragilités, les données considérées, les dépendances à d'autres services et les incertitudes prises en compte.

Tableau 56 : Proposition de notice explicative à cocher accompagnant les cartographies partagées par les opérateurs.

| MODALITES DE CONSTRUCTION DES CARTOGRAPHIES DE FRAGILITE |  |                          |
|--|--|--------------------------|
| Périmètre  | La totalité du périmètre d'action de l'opérateur est considérée                                      | <input type="checkbox"/> |
|  | Une partie du périmètre d'action de l'opérateur est considérée (expliciter et argumenter)            | <input type="checkbox"/> |
| Format de représentation                                 | Zonage de type buffer autour des infrastructures fragiles  | <input type="checkbox"/> |
|  | Position des infrastructures fragiles (linéaires ou ponctuelles)                                     | <input type="checkbox"/> |
| Données considérées pour le calcul des fragilités        | Position géographique des infrastructures  | <input type="checkbox"/> |
|  | Altitude des infrastructures   | <input type="checkbox"/> |
|  | Modélisation physique des perturbations au sein du réseau  | <input type="checkbox"/> |
|  | Prise en compte de la vulnérabilité des infrastructures à la présence d'eau                          | <input type="checkbox"/> |
|  | Prise en compte des solutions palliatives prévues (nature, conditions, hypothèses de fonctionnement) | <input type="checkbox"/> |
|  | Prise en compte des eaux souterraines (nappes, infiltrations...)                                     | <input type="checkbox"/> |
| Dépendances prises en compte                             | Electricité  | <input type="checkbox"/> |
|  | Télécommunications   | <input type="checkbox"/> |
|  | Transports ferrés  | <input type="checkbox"/> |
|  | Réseau routier   | <input type="checkbox"/> |
|  | Autres :   | <input type="checkbox"/> |
| Incertitudes prises en compte                            | Incertitudes liées à la hauteur d'eau  | <input type="checkbox"/> |
|  | Incertitudes liées à la vulnérabilité des infrastructures  | <input type="checkbox"/> |
|  | Incertitudes liées à l'évaluation des conséquences des dépendances                                   | <input type="checkbox"/> |
|  | Autres :   | <input type="checkbox"/> |

### *Un processus itératif d'échange et de mise à jour*

Aujourd'hui, l'ajout par d'autres gestionnaires de nouvelles cartes ou de cartes mises à jour sur la plateforme n'entraîne pas automatiquement une mise à jour des cartographies en interne chez les opérateurs (même s'ils entretiennent une relation de dépendance avec ces réseaux), et encore moins souvent une mise à jour des cartographies qu'ils partagent sur Alfresco. La prise en compte itérative des cartographies entre des opérateurs (inter)dépendants se rapproche alors de la méthode du couplage faible, qui correspond à une utilisation successive d'outils et de simulateurs sectoriels spécifiques à chaque réseau où les échanges se font via l'utilisation de zones d'impact face à un aléa particulier (Grangeat, 2017).

Les simulateurs sectoriels (ou outils et méthodes utilisés par chaque opérateur) utilisent alors en tant que données d'entrée les zones de défaillance des services dont ils sont dépendants, et produisent leurs propres zones de défaillance en conséquence. L'utilisation des zones d'impact comme moyen de transmission des informations permet de garantir l'autonomie des opérateurs, et la confidentialité des données sensibles, mais aussi de faciliter la compréhension par les différentes parties prenantes. La Figure 150 ci-dessous illustre cette méthode. Un ordre ou une hiérarchie au niveau des opérateurs de réseaux peut alors être établie en concertation avec ces derniers pour tenir compte des liens de dépendance et de leur criticité. Par exemple, les vulnérabilités du réseau de distribution électrique pourront être partagées en premier pour permettre aux autres réseaux de calculer leurs propres fragilités à l'inondation et aux coupures électriques du fait de la criticité de l'alimentation énergétique pour la plupart.

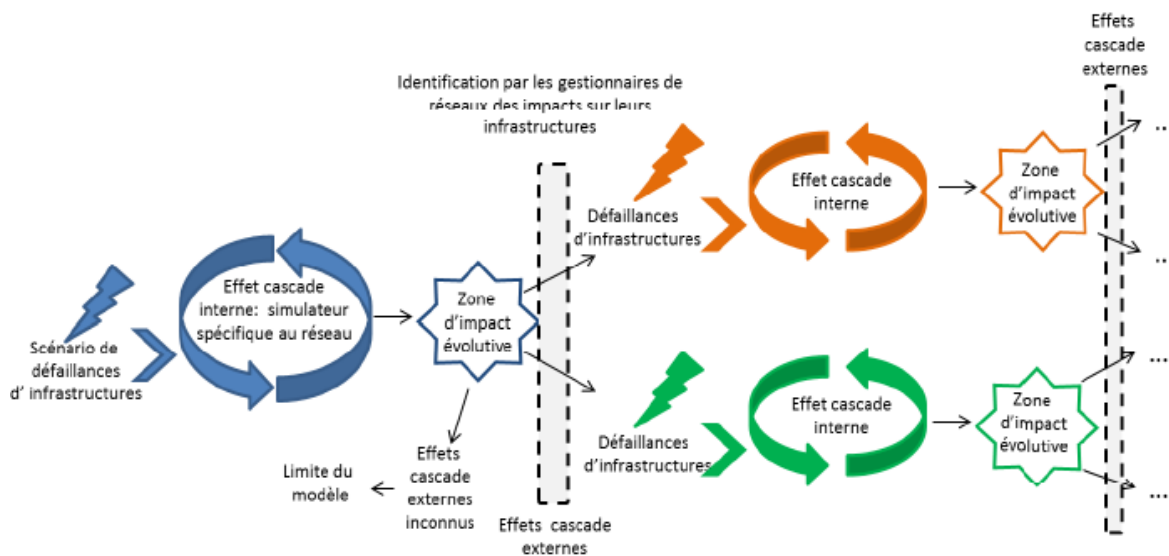


Figure 150 : Principe de fonctionnement du couplage faible entre simulateurs sectoriels, communiquant à travers des zones d'impact. Source : (Grangeat, 2017).

Cette méthode ne propose pas de rétroaction, mais nous proposons ici un processus itératif de construction et de mise à jour des cartographies selon les liens de dépendance entre les réseaux, notamment s'il existe des liens d'(inter)dépendances avérés. La connaissance des zones de défaillance (ou de fragilité dans notre cas) du réseau dont ils sont dépendants permet alors aux gestionnaires de produire de nouvelles cartes.

Nous illustrons le principe de ce processus avec la Figure 151. L'opérateur A construit la carte A1 de ses fragilités pour un scénario RX, puis la partage sur la plateforme. L'opérateur B qui est dépendant du service rendu par A construit alors la carte B1 de ses propres fragilités en tenant compte des impacts de cette dépendance. Il partage ensuite cette carte, qui va permettre à l'opérateur A de réévaluer ses fragilités s'il est lui-même dépendant du service rendu par l'opérateur B et de construire une nouvelle carte A2. Cette itération peut être répétée n fois, même si la plupart du temps les ordres d'itération demeurent limités.

Il nous faut finalement considérer que les propositions faites peuvent se heurter à des difficultés opérationnelles de mise en œuvre – comme discuté dans les chapitres précédents - mais aussi à des difficultés relatives à la gouvernance. En effet, comme cela a été soulevé dans le chapitre 7, les opérateurs n'ont aujourd'hui pas d'obligation concernant le partage de ces informations et la prise en compte de leurs dépendances.

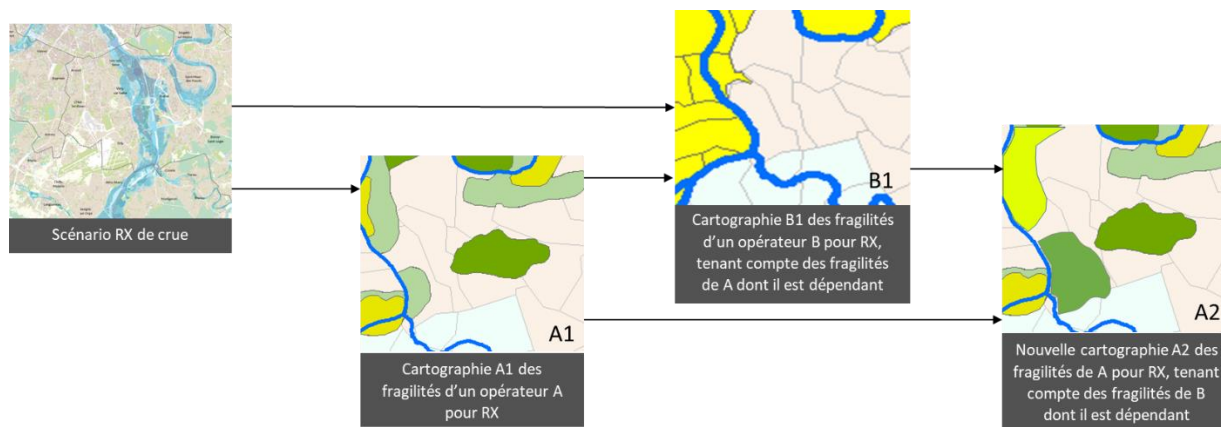


Figure 151 : Illustration du processus itératif de construction et de mise à jour des cartographies de fragilités selon les liens de dépendances entre les réseaux.

### 9.3.2.3. Retours opérationnels

Nous n'avons malheureusement pas eu le temps et l'occasion d'organiser un recueil formalisé et officiel des retours des parties prenantes opérationnelles quant aux propositions faites. Nous avons cependant appris que des discussions avaient été engagées depuis la fin du projet RGC4, qui a marqué la fin de notre accès aux cartographies. Certaines cartographies ont par exemple été mises à jour, en prenant notamment en compte les dépendances à l'électricité. La Zone de Défense et de Sécurité a par ailleurs demandé la clarification des définitions utilisées par les différents opérateurs, que ce soit au niveau des termes de « zones vulnérables » ou de la notion de « clients / abonnés / foyers » impactés. Un tableau récapitulatif des données de vulnérabilités accessibles est également en construction, ainsi qu'un processus d'itération entre les cartographies des opérateurs, ce qui va dans la même direction que ce que nous avons proposé.

## 9.4. LA CONSTRUCTION D'INDICES COMMUNAUX

### 9.4.1. L'intérêt de l'échelon municipal

On constate qu'en gestion de crise, l'échelon municipal revêt une importance toute particulière. Le niveau national peut en effet être associé à une échelle stratégique, le niveau zonal à une échelle opérationnelle, tandis que le niveau communal ou intercommunal constitue l'échelle tactique avec notamment les manœuvres des différents services sur le terrain (Piatyszek et al., 2018). En situation de crise, les maires doivent généralement prendre les premières mesures de protection des populations et des biens, par exemple la mobilisation de capacités d'hébergement (Fujiki, 2017). Les maires sont ainsi susceptibles d'occuper la position de directeur des opérations de secours sur le territoire de leurs communes, et incarnent dans tous les cas l'un des maillons majeurs de la gestion de crise.

En France, les obligations des maires sont par exemple le recensement des risques majeurs présents sur son territoire, la mise en œuvre des moyens visant à réduire la vulnérabilité des biens et des personnes, et l'information du public au travers du Document d'Information Communal sur les Risques Majeurs (DICRIM) si la commune figure sur la liste du Dossier Départemental des Risques Majeurs (DDRM) (Ahuir, 2016). La loi de modernisation de la sécurité civile (*LOI N° 2004-811 du 13 Août 2004 de Modernisation de La Sécurité Civile*, 2004) introduit le Plan Communal de Sauvegarde (PCS) en tant

que déclinaison du dispositif ORSEC à l'échelle de la commune. Ce PCS doit déterminer les mesures immédiates de sauvegarde et de protection des personnes selon les risques identifiés.

Nous constatons par ailleurs qu'une commune doit gérer la crise malgré de nombreuses contraintes concernant son organisation interne, ses rapports avec les services de l'Etat, mais aussi un manque de moyens (Fujiki, 2017). Les services communaux manquent généralement d'informations et de moyens au sujet des vulnérabilités des réseaux présents sur leurs communes, et cela constitue un axe majeur d'amélioration (Varesano, 2018). Les études réalisées par l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme d'Ile-de-France en tant qu'expérimentation du référentiel national de vulnérabilité aux inondations (MEEM, CEPRI, and Cerema, 2016) ont d'ailleurs utilisé cette échelle locale en se concentrant sur des communes particulièrement vulnérables au risque inondation : les communes de la boucle nord des Hauts de Seine et celles de l'agglomération de Vichy Val d'Allier. Ces travaux se basent cependant uniquement sur les données disponibles au sein de l'IAU et sur les fragilités électriques disponibles à l'époque (IAU, 2016). Parallèlement, les travaux de Fujiki (2017) ont permis de développer des indices sectoriels de vulnérabilité à l'échelle communale pour plusieurs thématiques de gestion de crise et de gestion post-catastrophe : un indice social de susceptibilité à l'évacuation, un indice social de susceptibilité à l'auto-hébergement, un indice de déstabilisation sociale. Par ailleurs, la vulnérabilité des réseaux d'eau potable (au niveau communal) et d'électricité (au niveau infra communal) a été prise en compte dans le calcul des besoins en évacuation. Ces travaux ont permis de montrer que les disparités géographiques –particulièrement au niveau communal - sont non seulement marquées mais variables selon la nature des impacts envisagés.

Le format cartographique semble ici pertinent pour servir de base à la construction d'indices à l'échelle communale pour renseigner sur les fragilités prévisibles des réseaux urbains. Au vu de la disparité des enjeux et des vulnérabilités selon les communes, il apparaît intéressant de pouvoir comparer celles-ci notamment pour des questions de solidarité et d'organisation intercommunale. Une question émerge alors : Comment tirer parti des cartographies de vulnérabilité - fragilité mises en place pour améliorer la prise en compte des potentielles défaillances des réseaux au niveau communal, en tenant compte des problèmes de confidentialité et de sensibilité des données ?

Nous proposons donc de construire des indices spatialisés par commune et par réseau, qui représenteraient les fragilités estimées de chaque réseau sur le périmètre de la commune, et ce pour les différents scénarios de crue établis. Ces indices pourraient entre autres permettre d'identifier des scénarios « seuils » à partir desquels on observe des cascades de différents réseaux, d'obtenir un indice opérationnel à l'échelle d'action des gestionnaires de crise (en gardant à l'esprit les hypothèses et incertitudes relatives), d'identifier des profils de communes selon les tendances observées... La détermination de zones d'appui dont les réseaux continueraient de fonctionner pendant la crue pourrait apporter un réel avantage opérationnel par exemple.

#### 9.4.2. La méthodologie proposée

Nous présentons tout d'abord la méthodologie générique pour la construction et le calcul des indices à l'échelle communale. Celle-ci va principalement dépendre du contenu et de la forme des données relatives aux fragilités des réseaux techniques disponibles sur le territoire. De façon générale, les indices se basent sur le rapport entre les parties du réseau potentiellement défaillantes et l'ensemble du réseau, afin de pouvoir comparer des réseaux et des données disparates.

$$i = \frac{\text{réseau potentiellement défaillant}}{\text{réseau total}}$$

L'objectif principal étant la comparaison et le traitement unifié des résultats obtenus, nous avons fait le choix de les normaliser. Les indices, dont la valeur varierait donc entre 0 et 1, sont alors exprimés grâce à la formule suivante :

$$i = \frac{\text{réseau total} - \text{réseau potentiellement défaillant}}{\text{réseau total}}$$

L'expression « réseau potentiellement défaillant » de la formule ci-dessus traduit différentes réalités opérationnelles, et peut être exprimé de différentes façons. Ce rapport peut ainsi se faire entre des surfaces, des nombres d'infrastructures, des nombres de clients, ou des linéaires de réseaux selon les données utilisées et partagées par les opérateurs, et la pertinence de l'analyse au vu du fonctionnement du réseau. Quelques exemples génériques sont proposés ci-dessous :

$$i = \frac{\text{surface totale} - \text{surface au sein de laquelle le réseau est potentiellement défaillant}}{\text{surface de la zone totale}}$$

$$i = \frac{\text{nombre d'infrastructures total} - \text{nombre d'infrastructures potentiellement défaillantes}}{\text{nombre d'infrastructures total}}$$

$$i = \frac{\text{nombre de clients total} - \text{nombre de clients potentiellement non desservis}}{\text{nombre de clients total}}$$

$$i = \frac{\text{linéaire total} - \text{linéaire potentiellement défaillant}}{\text{linéaire total}}$$

Nous détaillons dans le Tableau 57 ci-dessous les propositions de formules à appliquer selon les données et les types de réseaux techniques. Ce tableau propose ainsi des formules pour les réseaux techniques urbains suivants, en se basant sur leur organisation et leur fonctionnement mais aussi sur les données de fragilité disponibles au sein de l'agglomération parisienne :

- Réseau de distribution d'électricité
- Réseau de distribution de gaz
- Réseau de télécommunication (mobile et fixe)
- Réseau de distribution d'eau potable
- Réseau de chauffage urbain
- Réseau routier
- Réseau de collecte des déchets
- Réseau de transports en commun
- Réseau d'assainissement

Des traitements des données sont parfois nécessaires avant l'application de la formule, notamment pour les formules où la mention « à calculer » figure. Des indications à ce sujet sont données sur la ligne inférieure si besoin, et l'illustration présentée à la suite donnera des exemples de traitements effectués grâce à un logiciel de Sciences de l'Information Géographique de type ArcGis – Qgis. L'utilisation de la surface urbanisée en tant que surface de référence permet de tenir compte des spécificités des communes rurales, et d'éviter les écueils liés au fait que certains gestionnaires ne vont pas tenir compte des espaces verts ou agricoles dans leur cartographie, tandis que d'autres en tiennent compte.

Tableau 57 : Formules applicables pour le calcul des indices selon les types de réseaux et les données disponibles.

| Type de réseau  | Données de fragilité                                 | Format     | Formules applicables pour le calcul des indices communaux   |
|---|--|------------|---|
| Réseau de transport en commun   | Stations fragiles                                    | Ponctuel   | $i = \frac{(\text{surface de la commune urbanisée} - \text{surfaces de rabattement des infras fragiles (à calculer)})}{\text{surface de la commune urbanisée}}$ |
| NB : Il est possible de calculer des zones de rabattement / desserte autour des points de collecte en partant de l'hypothèse que les usagers se rendent à la gare la plus proche à l'aide de triangulation de Delaunay.                               |  |            |   |
| Réseau de collecte des déchets  | Points de collecte fragiles (verre, déchetteries...) | Ponctuel   | $i = \frac{(\text{nombre total d'infras} - \text{nombre d'infras fragiles})}{\text{nombre total d'infras}}$   |
| Réseau de télécommunications mobile   | Antennes fragiles                                    | Ponctuel   | $i = \frac{(\text{surface de la commune urbanisée} - \text{surfaces buffer autour des infras fragiles (à calculer)})}{\text{surface de la commune urbanisée}}$  |
| Réseau de distribution de gaz   | Postes fragiles                                      | Ponctuel   | $i = \frac{(\text{linéaire total du réseau} - \text{linéaire desservi par les infrastructures fragiles (à calculer)})}{\text{linéaire total du réseau}}$        |
| NB : Il est possible de calculer les linéaires desservis par une infrastructure en partant de l'hypothèses que tous les linéaires partant d'une infrastructure intermédiaire donné sont desservis par celle-ci.                                       |  |            |   |
| Réseau de chauffage urbain  | Chaufferies fragiles                                 | Ponctuel   | $i = \frac{(\text{linéaire total du réseau} - \text{linéaire desservi par les infrastructures fragiles (à calculer)})}{\text{linéaire total du réseau}}$        |
| NB : Il est possible de calculer les linéaires desservis par une infrastructure en partant de l'hypothèses que tous les linéaires partant d'une infrastructure intermédiaire donné sont desservis par celle-ci. Pour le cas des réseaux redondants ?? |  |            |   |
| Réseau de distribution électrique   | Surfaces buffers autour des postes fragiles          | Surfacique | $i = \frac{(\text{surface de la commune urbanisée} - \text{surfaces des zones buffer})}{\text{surface de la commune urbanisée}}$                                |
| Réseau routier  | Linéaire de réseau fragile                           | Linéaire   | $i = \frac{(\text{linéaire total du réseau} - \text{linéaire fragile})}{\text{linéaire total du réseau}}$   |
| Réseau de télécommunication fixe  | Boîtiers de raccordement des immeubles fragiles      | Ponctuel   | $i = \frac{(\text{nombre de points de livraison total} - \text{nombre de points de livraison fragiles})}{\text{nombre de points de livraison total}}$           |
| NB : Les points de livraison peuvent incarner des logements dans le cas de postes individuels, des immeubles dans le cas de compteurs collectifs, des îlots... selon le type de réseau.   |  |            |   |
| Réseau de distribution d'eau potable  | Îlots alimentés par une partie fragile du réseau     | Surfacique | $i = \frac{(\text{surface de la commune urbanisée} - \text{surface des zones îlots fragiles (à calculer)})}{\text{surface de la commune urbanisée}}$            |
| Réseau d'assainissement   | Surfaces alimentées par une partie fragile du réseau | Surfacique | $i = \frac{(\text{surface de la commune urbanisée} - \text{surface des zones fragiles})}{\text{surface de la commune urbanisée}}$                               |



### 9.4.3. Illustration de la méthodologie avec le réseau de distribution électrique

Nous prendrons l'exemple du réseau de distribution électrique, donc les zones de fragilité sont représentées dans la

Figure 152. La carte est ici volontairement à une échelle ne permettant pas d'identifier précisément les contours des zones de fragilité électrique estimées par l'opérateur. L'indice correspondant aux fragilités du réseau électrique (dont les caractéristiques des cartographies sont présentées dans le Tableau 58) indique le ratio de la surface non impactée par la crue sur la surface totale de la commune, car les cartographies de fragilité du réseau électrique sont présentées sous la forme de buffers autour de postes coupés (qui sont parfois déjà regroupés).

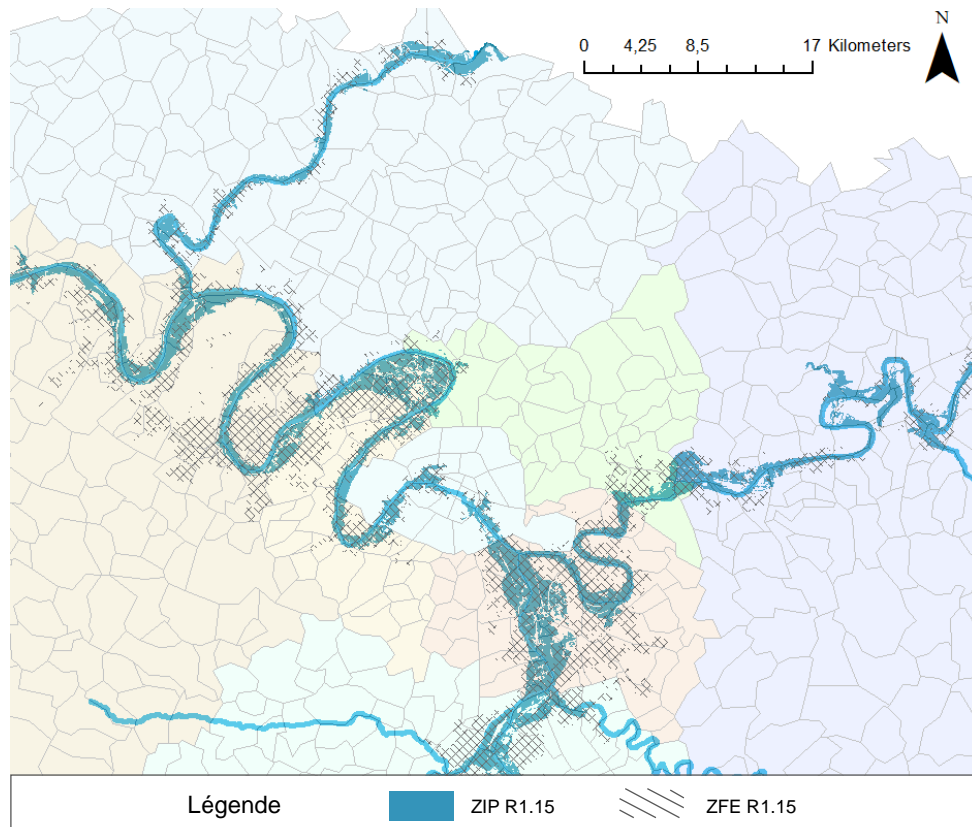


Figure 152 : Les zones de fragilité électrique (ZFE) de l'agglomération parisienne pour un scénario R1.15.

Tableau 58 : Caractéristiques des cartographies de fragilités proposées par Enedis.

| Réseau      | Opérateur | Périmètre d'action | Périmètre de cartographie | Scénarios              | Type de données                            | Représentation |
|-------------|-----------|--------------------|---------------------------|------------------------|--|----------------|
| Electricité | ENEDIS    | Ile-de-France      | Ile-de-France             | R060, R080, R100, R115 | Surfaces buffer autour des postes fragiles | Surfacique     |

On a alors la formule suivante à appliquer :

$$i_{\text{électricité}} = \frac{\text{surface de la commune} - \text{surface totale de l'enveloppe des buffers sur la commune}}{\text{surface de la commune}}$$

Des traitements préparatifs des cartographies et des données associées sont nécessaires. Des traitements sont tout d’abord nécessaires pour obtenir la surface de l’enveloppe des buffers (cf. Figure 155B), qui peuvent se chevaucher par endroit et qui sont initialement indépendants des limites géographiques de la commune (cf. Figure 153A). Des actions de dissection, d’intersection avec les limites des communes, de calcul de la surface des nouveaux polygones et d’exportation doivent être réalisées.

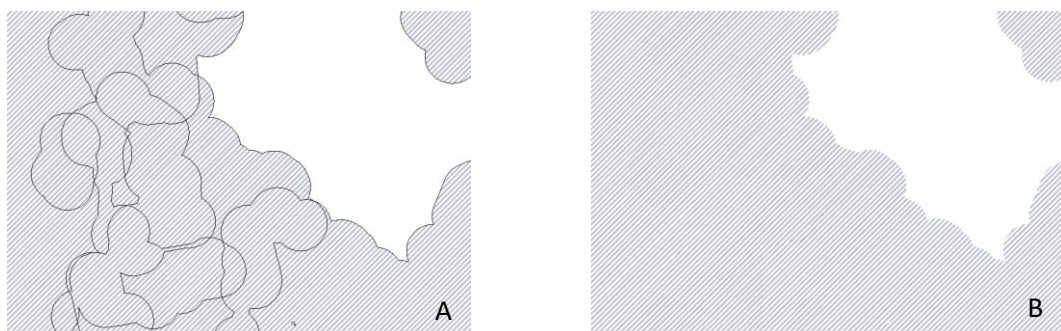


Figure 153 : Les zones de fragilité électrique, représentées sous la forme de buffers (A) et sous la forme d’enveloppes (B).

#### 9.4.4. Résultats obtenus et utilisations possibles

Nous reprecisons que les données relatives aux fragilités des réseaux techniques de l’agglomération parisienne, et les résultats obtenus à partir de celles-ci, sont confidentielles. L’accès à ces derniers est réservé aux signataires de la Déclaration d’Intention, et seulement des extraits sont donc présentés ici.

Le Tableau 59 reprend ci-dessous un extrait des tableurs Excel réalisés pour le calcul des indices sur quelques communes des Hauts-de-Seine classées par ordre alphabétique, dont l’exposition à l’inondation est plus ou moins forte. On y retrouve notamment les communes d’Asnière sur Seine, Bois-Colombes et Boulogne-Billancourt qui sont situées près de la Seine. Les colonnes renseignent le nom de la commune (« Nom-commune »), le code postal (« Code », la surface urbanisée de la commune (« S\_urbanisée »), la surface des zones de fragilité électrique (« S\_ZFE\_X.X ») qui a été extraite d’ArcGis-QGis, et l’indice concernant les fragilités électriques (« lélecX.X ») obtenu pour chaque scénario de crue RX.X à partir de la formule suivante : «  $lélecX.X = S\_ZFE\_X.X / S\_urbanisée$  ».

Tableau 59 : Processus de calcul des indices de dégradation du fonctionnement du réseau de distribution électrique pour quelques communes des Hauts--de-Seine.

| Nom_commune          | Code  | S_urbanisée | S_ZFE_0.6 | S_ZFE_0.8 | S_ZFE_1.0 | S_ZFE_1.15 | lélec0.6 | lélec0.8 | lélec1.0 | lélec1.15 |
|----------------------|-------|-------------|-----------|-----------|-----------|------------|----------|----------|----------|-----------|
| Antony               | 92002 | 9808871     | 0         | 0         | 0         | 0          | 1,00     | 1,00     | 1,00     | 1,00      |
| Asnières-sur-Seine   | 92004 | 5201354     | 0         | 0         | 3309121   | 4826390    | 1,00     | 1,00     | 0,36     | 0,07      |
| Bagneux              | 92007 | 4240759     | 0         | 0         | 0         | 0          | 1,00     | 1,00     | 1,00     | 1,00      |
| Bois-Colombes        | 92009 | 1820066     | 0         | 0         | 915327    | 1617676    | 1,00     | 1,00     | 0,50     | 0,11      |
| Boulogne-Billancourt | 92012 | 5938465     | 0         | 6420      | 4518364   | 4575240    | 1,00     | 1,00     | 0,24     | 0,23      |
| Bourg-la-Reine       | 92014 | 1754438     | 0         | 0         | 0         | 0          | 1,00     | 1,00     | 1,00     | 1,00      |

|                  |       |         |   |   |   |   |      |      |      |      |
|------------------|-------|---------|---|---|---|---|------|------|------|------|
| Chatenay-Malabry | 92019 | 6565409 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
|------------------|-------|---------|---|---|---|---|------|------|------|------|

Les impacts n'apparaissent qu'à partir du scénario R1.0 sur la majorité de ces communes, à l'exception de Boulogne-Billancourt qui est perturbée à partir de R0.8. Plus la surface inondée augmente, plus la surface des zones de fragilité électrique augmente, et plus l'indice diminue et se rapproche logiquement du 0. On observe notamment que près de 90% de la surface des communes très exposées est en situation de fragilité électrique pour un scénario R1.15.

Des résultats globaux obtenus pour le réseau de distribution électrique sur l'ensemble du territoire francilien sont présentés ci-dessous. Le Tableau 60 reprend ainsi le pourcentage de communes où le réseau de distribution électrique est impacté selon les différents scénarios de crue. Nous considérons comme impactées les communes dont l'indice de fonctionnement du réseau de distribution électrique est strictement inférieur à 1,0. 60 communes sont ainsi touchées dès le scénario R0.6, tandis que 349 communes sont impactées pour le scénario R1.15, c'est-à-dire plus d'un quart des communes d'Ile-de-France.

Tableau 60 : Pourcentage de communes où le réseau de distribution électrique est impacté pour les différents scénarios de crue

| Scénarios                         | R0.6 | R0.8 | R1.0 | R1.15 |
|-----------------------------------|------|------|------|-------|
| Pourcentage de communes impactées | 4,6  | 14,0 | 23,5 | 26,9  |

La Figure 154 représente quant à elle sous forme d'histogramme la répartition des communes de la région francilienne selon différents intervalles de valeurs de l'indice de fonctionnement du réseau de distribution électrique, et ce pour les 4 scénarios de crue analysés. On observe un effet de seuil à partir du scénario R1.0, où un grand nombre de communes voient leur indice de fonctionnement du réseau électrique passer en-dessous la barre des 0.8, soit plus de 20% de fonctionnement perturbé. Pour le scénario R1.0, l'indice de fonctionnement est compris entre 0.8 et 1.0 pour plus de la moitié des communes impactées (196 communes), tandis qu'une vingtaine de communes voient leur indice descendre entre 0.2 et 0.4 et une vingtaine de communes voient leur indice descendre en-dessous de 0.2.

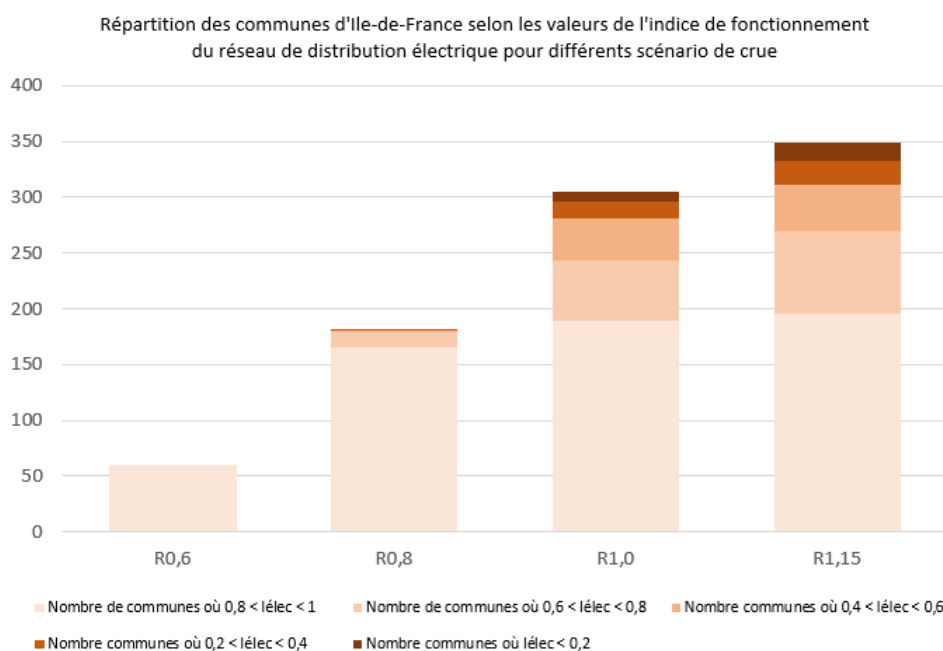


Figure 154 : Représentation graphique de la répartition des communes d'Ile-de-France selon les valeurs de l'indice de fonctionnement du réseau de distribution électrique pour différents scénarios de crue.

L'évolution de la moyenne des valeurs des indices communaux de fonctionnement du réseau électrique a également été analysée par département, dans une optique de comparaison des territoires en vue de solidarités interdépartementales par exemple. La Figure 155 reprend ainsi graphiquement les résultats de cette analyse pour les huit départements franciliens. Les résultats de l'analyse à l'échelle communale ne sont pas présentés ici par soucis de confidentialité.

On observe que les Hauts-de-Seine et le Val-de-Marne font partie des départements les plus fortement touchés, avec un seuil au niveau du passage au scénario de crue R1.0. Cela s'explique principalement par la forte exposition de ces départements aux débordements des cours d'eau qui les traversent, à savoir la Seine pour les Hauts-de-Seine et la Seine et la Marne pour le Val-de-Marne.

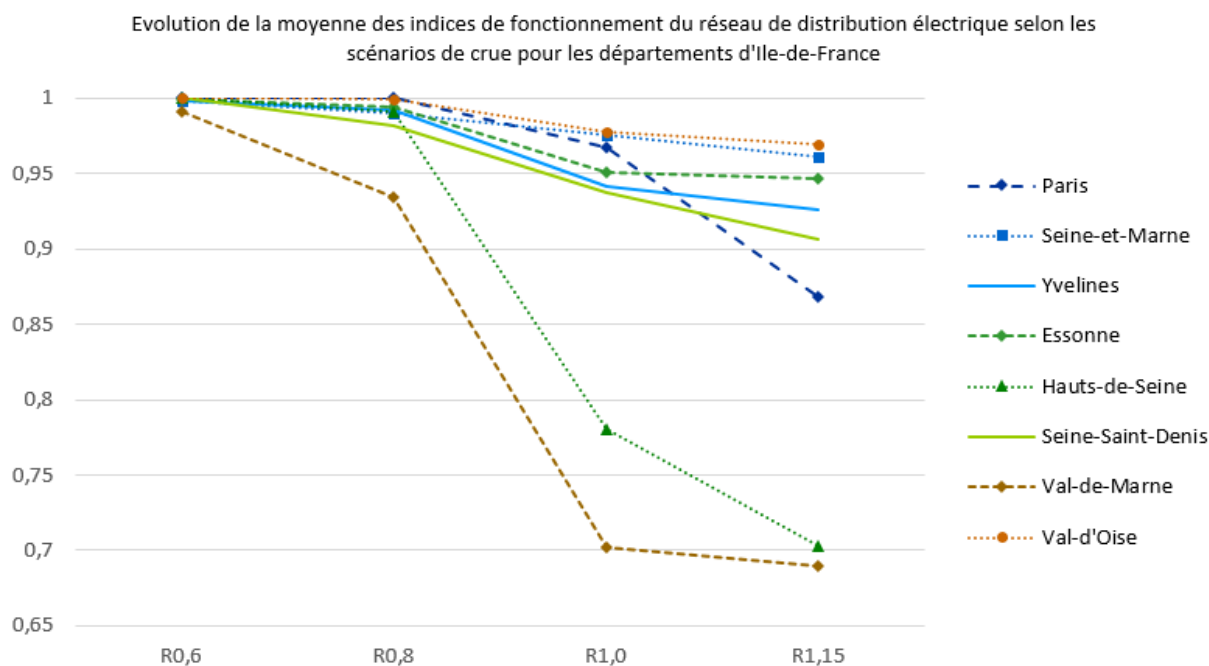


Figure 155 : Représentation sous forme graphique de l'évolution des moyennes des valeurs des indices communaux de fonctionnements du réseau de distribution électrique selon les scénarios de crue pour les départements d'Ile-de-France.

Afin d'illustrer les utilisations possibles des résultats obtenus, nous prendrons maintenant l'exemple de 6 communes voisines du Val-de-Marne, situées autour de la boucle de la Marne de Joinville et dont une grande partie des territoires est en zone inondable. Ces communes sont situées sur la Figure 156 ci-dessous.

Nous reprenons ici l'exemple du réseau d'électricité mais nous intégrons également certains résultats obtenus pour le réseau d'assainissement, afin d'illustrer les possibilités offertes par la combinaison et comparaison des résultats de différents réseaux. Le Tableau 61 reprend donc l'évolution des indices calculés pour les réseaux d'électricité et d'assainissement au niveau de ces 6 communes, et ce pour les scénarios R0.6, R0.80, R1.0 et R1.15.

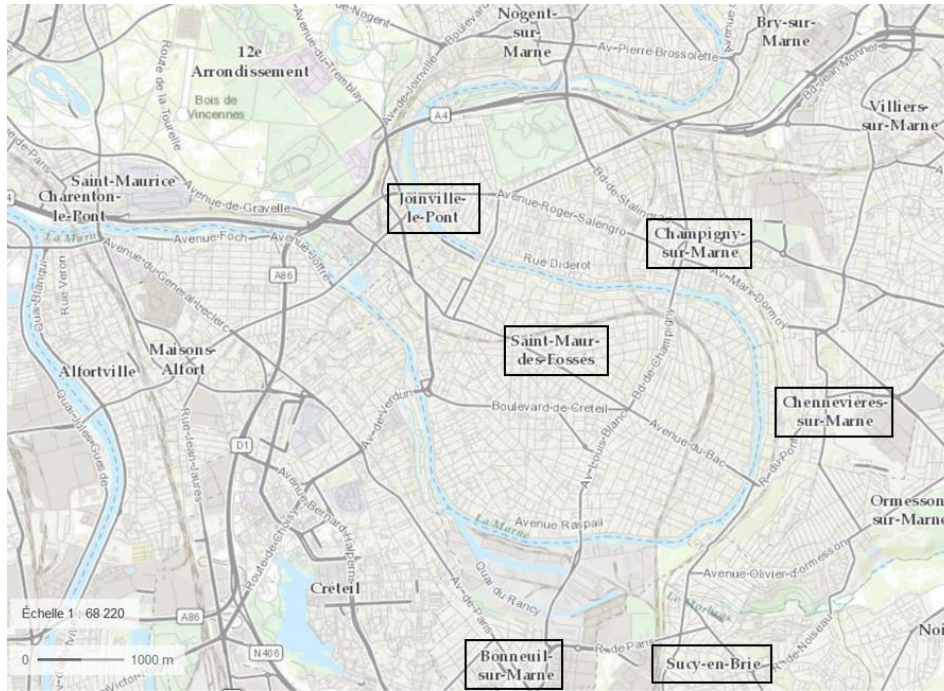


Figure 156 : Position des communes du département de Val-de-Marne dont les résultats sont présentés ci-dessous.  
Source du fonds de carte : Géoportail.

Tableau 61 : Evolution des indices pour l'électricité et l'assainissement au niveau de différentes communes.

| Communes               | lélec0.6 | lélec0.8 | lélec1.0 | lélec1.15 | lass0.6 | lass0.8 | lass1.0 |
|------------------------|----------|----------|----------|-----------|---------|---------|---------|
| Joinville-le-Pont      | 0,93     | 0,62     | 0,14     | 0,14      | 0,90    | 0,89    | 0,00    |
| Saint-Maur des Fossés  | 1,00     | 0,82     | 0,14     | 0,10      | 1,00    | 0,86    | 0,01    |
| Chennevières-sur-Marne | 0,98     | 0,94     | 0,61     | 0,61      | 0,60    | 0,58    | 0,58    |
| Ormesson-sur-Marne     | 1,00     | 0,93     | 0,89     | 0,89      | 0,76    | 0,76    | 0,49    |
| Sucy-en-Brie           | 1,00     | 0,98     | 0,56     | 0,56      | 0,96    | 0,78    | 0,79    |
| Bonneuil-sur-Marne     | 1,00     | 0,98     | 0,33     | 0,33      | 0,98    | 0,58    | 0,56    |

Dans l'exemple présenté ci-dessus, les données nécessaires au calcul des indices de l'assainissement pour le scénario R1.15 ne sont pas disponibles, tandis qu'elles le sont pour les fragilités électriques. On observe que les impacts apparaissent à partir du scénario R060 pour certaines communes. Des effets de seuils sont également observés entre les scénarios R1.0 et R1.15 pour l'électricité et entre les scénarios R0.8 et R1.0 pour l'assainissement. Les communes de Joinville-le-Pont et de Saint-Maur des Fossés, situées au cœur de la boucle, sont ici les plus fragiles.

Ces indices permettent alors de comparer certaines communes voisines selon des paramètres communs et d'analyser pour une commune ou un groupe de communes la criticité de la situation par scénario. Cette analyse peut permettre d'identifier un créneau critique dans l'évolution de la crue, ou

la tombée en cascade des réseaux à partir d'un scénario. La mise en commun de moyens ou des actions de solidarité intercommunale pourrait potentiellement se fonder sur ces éléments.

L'analyse des indices communaux peut également permettre l'identification de différents profils de communes, selon l'évolution du fonctionnement des réseaux sur leur territoire. Deux exemples sont présentés ci-dessous, reprenant deux réseaux au sein de quatre communes du Val-de-Marne. Un graphique des deux indices pour les communes de St-Maur des Fossés et de Joinville le Pont est présenté à la Figure 157. Celles-ci correspondent à un premier profil de communes concernant le fonctionnement des réseaux de distribution électrique et d'assainissement face à la crue. On observe en effet un seuil critique pour les deux communes et les deux réseaux lors du basculement sur le scénario R1,0, à partir duquel les réseaux sont défaillants sur la majorité du territoire. Un deuxième profil peut être illustré avec la représentation des deux indices pour les communes de Chennevières-sur-Marne et Sucy-en-Brie, présentée à la Figure 158. On observe une diminution de la surface où la distribution d'électricité fonctionne pour les deux communes entre R0,8 et R1,0 pour l'électricité, mais cette diminution demeure raisonnable. Et l'évolution du fonctionnement de l'assainissement ne connaît pas de seuil particulièrement critique.

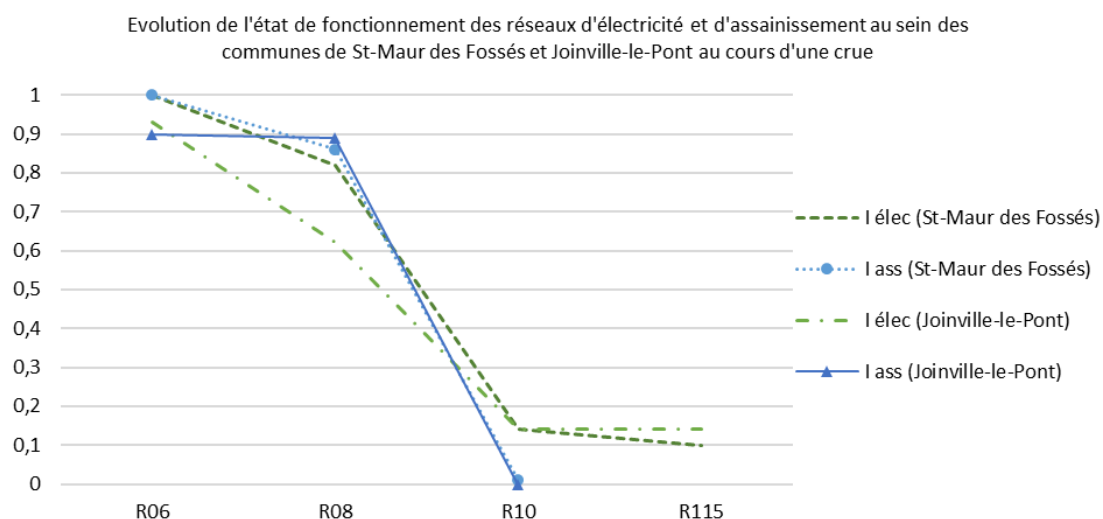


Figure 157 : Evolution de l'état de fonctionnement des réseaux d'électricité et d'assainissement des communes de St-Maur des Fossés et Joinville-le-Pont.

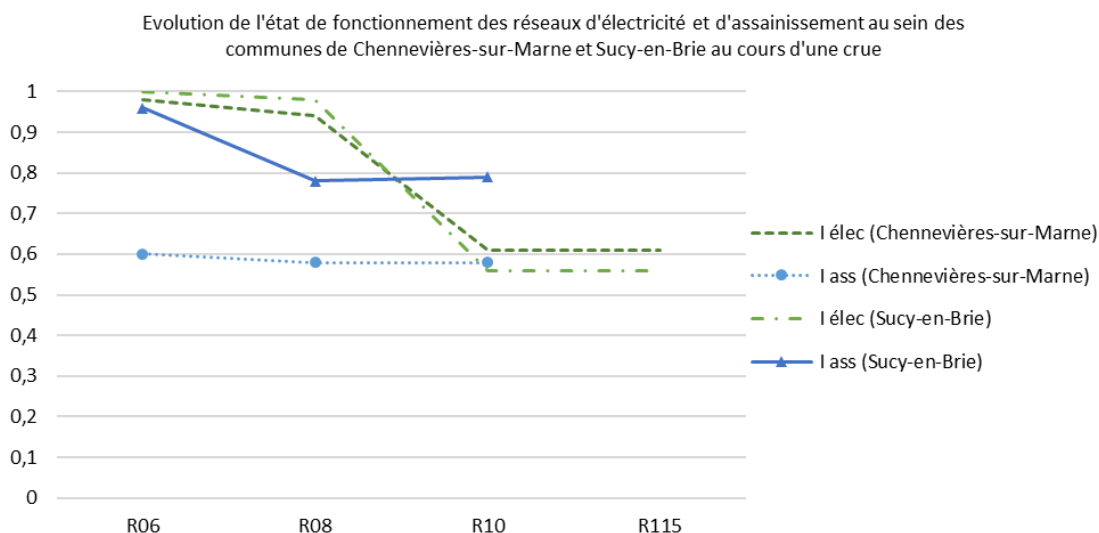


Figure 158 : Evolution de l'état de fonctionnement des réseaux d'électricité et d'assainissement des communes de Chennevières-sur-Marne et Sucy-en-Brie.

Des méta-indices peuvent potentiellement être construits par la suite, à partir de méthodes d'analyse multicritères ou plus simplement à partir de l'agrégation des indices communaux correspondant aux différents réseaux techniques, afin d'obtenir un unique indice au sein d'une commune pour chaque scénario. Cependant, cette agrégation nécessite le choix des pondérations à associer au niveau de fonctionnement de chaque réseau. Certains décideurs pourraient par exemple considérer que l'état de fonctionnement du réseau de distribution électrique a plus de poids que celui de la collecte des déchets dans un contexte de gestion de crise, tandis que d'autres pourraient considérer que ce sont les transports en commun qui sont au centre de la continuité d'activité du territoire dans un contexte de crue modérée, ou même que tous les réseaux techniques urbains sont d'égale importance. Ce choix peut donc être laissé aux décideurs, selon l'usage souhaité des indices et le contexte dans lequel ils sont produits. C'est pourquoi nous avons choisi de ne pas présenter de cartographie générale agrégeant les indices des différents réseaux et de respecter par la même occasion les exigences de confidentialité associées.

#### 9.4.5. Les limites et difficultés relatives à la construction des indices

Cette proposition d'indices communaux se heurte aujourd'hui à plusieurs difficultés, liées notamment à la construction des cartographies sur lesquels ils sont basés :

- Les formats de représentation utilisés par les opérateurs diffèrent, parfois pour un même réseau, et peuvent rendre les comparaisons délicates
- Le travail de mise en cohérence des cartographies de « vulnérabilités » ou fragilités doit être réalisé au préalable
- Les données demeurent parfois indisponibles pour certains réseaux, certaines zones, ou certains scénarios
- Il est nécessaire de démontrer aux opérateurs l'intérêt de cette proposition pour la planification et la gestion opérationnelle du territoire, notamment afin qu'ils acceptent de partager les résultats de ces analyses aux services municipaux

La question de la confidentialité des données de vulnérabilités - fragilités est ici facilitée par le lissage des informations au niveau communal, et par la possibilité d'utiliser seulement des méta-indices reprenant l'état de plusieurs réseaux au sein d'une commune.

## 9.5. CONCLUSION

Ce chapitre 9, le dernier du manuscrit, permet de fournir des pistes de réflexion et d'actions à mener au sein de l'agglomération parisienne pour améliorer la prise en compte et la prévision des (inter)dépendances et des défaillances en cascade au niveau des réseaux techniques urbains. Des démarches théoriquement envisageables sont tout d'abord identifiées, selon les solutions techniquement possibles.

Le besoin de leadership est également discuté, pour l'identification d'objectifs opérationnels raisonnables, communs et clairs. Il apparaît nécessaire de développer des démarches collectives, dont l'intérêt est clair pour toutes les parties prenantes, et qui sont bien appréhendées par tous. Ces démarches pourront alors fonctionner et être mises à jour de manière autonome au sein du groupe, sans support de parties externes telles que les experts ou chercheurs impliqués dans le développement



et la mise en œuvre initiale. Celles-ci doivent, de plus, viser une certaine complémentarité et une potentielle imbrication dans le cadre d'une approche globale cohérente.

Trois propositions s'appuyant sur le contexte opérationnel actuel, sont ensuite élaborées : une analyse des retours d'expérience des crues de 2016 et 2018 concentrée sur les impacts au niveau des réseaux, une méthodologie de construction et de mise à jour des cartographies de vulnérabilités-fragilités utilisées aujourd'hui, et la construction d'indices communaux reprenant l'état de fonctionnement des réseaux. L'utilisation des cartographies semble aujourd'hui suffire aux besoins opérationnels, et un accompagnement pour l'amélioration de leur construction et de leur utilisation semble donc pertinent.

## CONCLUSION DE LA PARTIE III

Cette troisième et dernière partie du manuscrit a permis d'analyser notre problématique dans le contexte particulier de l'agglomération parisienne face à une crue majeure, grâce aux enseignements des deux premières parties. Cette agglomération est particulièrement critique du fait de son importance géopolitique, socio-économique et stratégique mais aussi du fait de sa complexité très forte. Le nombre, la diversité, les relations et les initiatives des différents acteurs impliqués dans la problématique des réseaux techniques complexifient en effet notre zone d'étude.

L'analyse de la situation au niveau de la gestion des réseaux techniques s'est faite par le biais d'analyses, d'observations, de rencontres et d'entretiens et a permis de réaliser que les connaissances, les données disponibles, les outils utilisés et les initiatives de gestion du risque de crue varient fortement selon les différents opérateurs de réseaux interrogés. Les opérateurs partagent cependant la conscience des enjeux relatifs à la problématique des (inter)dépendances et des défaillances en cascade induites dans un contexte de crue.

Les différentes initiatives portées par des chercheurs, des institutions impliquées dans la gestion du risque inondation, des services de l'Etat ou des collectivités ont permis l'amélioration des connaissances des relations de dépendances entre les réseaux mais n'ont pas permis de réelle identification et prise en compte des phénomènes de défaillances en cascade, et considèrent souvent seulement une partie du territoire ou un scénario donné.

En l'état actuel, le Secrétariat Général à la Zone de Défense et de Sécurité de Paris et la DRIEE Ile-de-France nous semblent être pertinents en tant que porteurs centraux d'une initiative collective. Dans le cadre de la présentation de pistes de réflexion et d'actions à mener, trois propositions complémentaires en co-construction sont élaborées. Celles-ci se fondent sur les initiatives, besoins et usages actuels.

Tout d'abord, une analyse des retours d'expérience des crues de 2016 et 2018 concentrée sur les impacts au niveau des réseaux est présentée. Une méthodologie de construction et de mise à jour des cartographies de vulnérabilités- fragilités utilisées aujourd'hui, et la construction d'indices communaux reprenant l'état de fonctionnement des réseaux en mode dégradé en situation de crue sont également proposées.

# CONCLUSION GENERALE

## Rappel de la problématique

Notre recherche s'est concentrée sur les réseaux techniques urbains, sur lesquels repose le fonctionnement des systèmes urbains. Ces réseaux demeurent vulnérables aux aléas majeurs, notamment aux inondations, et sont dépendants les uns des autres. Des phénomènes de défaillances en cascade peuvent alors survenir au sein de ces systèmes complexes, de façon inter et intra sectorielle. Les travaux présentés ont exploré ces phénomènes, mais aussi les initiatives permettant leur identification, leur étude et leur modélisation.

La démarche exposée dans ce manuscrit s'est alors basée sur un parti-pris fort. Au vu de la multiplicité et de la complexité de mise en œuvre des initiatives développées actuellement, il nous a en effet semblé pertinent de ne pas chercher à construire un énième prototype. L'objectif a alors été de prendre du recul et de construire une réflexion à destination des chercheurs mais aussi des parties prenantes opérationnelles, en considérant les aléas et les contextes opérationnels comme des données d'entrées. La question de la mise en œuvre et de l'adéquation de ces initiatives à leur contexte d'application a donc été au cœur de cette recherche, avec la proposition d'éléments d'aide au choix.

## Synthèse de la démarche

La première étape de la démarche a été la définition et la caractérisation de ces phénomènes et de leur contexte d'apparition. Les travaux effectués ont tout d'abord permis de proposer une définition cohérente des phénomènes de défaillances en cascade et une caractérisation adaptée. Cette propagation physique, cybernétique, logique ou géographique des défaillances d'un système à d'autres se fait par le biais de dépendances et entraîne l'aggravation progressive des impacts de l'événement initial et l'accroissement de la zone impactée. Leur importance, leur complexité, leur criticité, et paradoxalement le manque d'informations qui s'y rapportent ont ensuite été démontrées notamment par le biais d'analyses empiriques et de retours d'expérience.

La deuxième étape a permis l'établissement d'un état de l'art des démarches d'étude et de modélisation de ces phénomènes. Celui-ci a démontré leur diversité et a permis de les caractériser selon des paramètres susceptibles de correspondre aux critères de choix potentiels : objectifs poursuivis, granularités, données nécessaires, résultats obtenus, etc. Une typologie plus théorique de ces démarches, basée sur les principes ascendant, descendant, et fédérateur - complémentaire à la caractérisation des théories de modélisation utilisées dans la littérature - a également été proposée.

La troisième étape de la démarche entreprise a abordé la question de la mise en œuvre opérationnelle de ces démarches. Les recherches menées nous ont permis d'avancer qu'en l'état actuel des recherches et des développements mais aussi au vu de la maturité de la plupart des parties prenantes opérationnelles, la mise en œuvre d'une démarche idéale, universelle et complète au sein de l'ensemble des réseaux techniques urbains n'est pas envisageable. De nombreuses difficultés scientifiques, techniques et pratiques rendent en effet laborieuses la construction et la mise en œuvre de modèles fidèles à la complexité et la dynamique de la réalité des réseaux techniques urbains (inter)dépendants.

La quatrième étape engagée a permis d'aborder la question du choix et du développement d'une démarche appropriée par les décideurs locaux. Il a été démontré que ces démarches doivent être pensées dans leurs contextes de mises en œuvre et adaptées aux caractéristiques de ceux-ci. L'objectif a alors été d'aider les porteurs potentiels à construire une démarche capable de répondre aux besoins et objectifs des parties prenantes locales et ce malgré leurs contraintes, de fonctionner avec des données potentiellement très diverses et imparfaites, de s'adapter à des résolutions spatio-temporelles et des granularités variables, mais aussi de tirer parti des connaissances acquises par les acteurs locaux et des outils et ressources disponibles.

On souligne la complémentarité des différentes démarches envisageables, qu'elles soient qualitatives ou quantitatives, à granularité faible ou élevée, appliquées à une zone spatiale étendue ou limitée, qu'elles portent sur un ou plusieurs réseaux. L'intérêt de démarches hybrides, multi-granulaires, multi-scalaires et flexibles, selon les objectifs poursuivis par les porteurs est alors soulevé. Nous avons finalement proposé plusieurs profils-types de démarches, caractérisés selon les objectifs poursuivis et le contexte de mise en œuvre.

La dernière étape de cette recherche a consisté en une application sur les réseaux techniques de l'agglomération parisienne face au risque de crue majeure, qui est particulièrement probable et redouté. L'objectif était d'apporter des éléments de diagnostic et des propositions pour améliorer la prise en compte et la prévision des (inter)dépendances et des défaillances en cascade au sein des réseaux techniques urbains présents sur l'agglomération. Cette analyse a été réalisée dans le cadre d'un examen approfondi du contexte, de rencontres avec les parties prenantes et d'une enquête auprès des opérateurs de réseaux.

Ce travail a notamment permis la construction de propositions concernant les cartographies de vulnérabilité utilisées actuellement, afin d'améliorer leurs processus de construction, d'utilisation et de capitalisation par le biais d'indices communaux notamment. Des retours d'expériences focalisés sur les impacts au niveau des réseaux techniques urbains ont également été réalisés pour les crues de juin 2016 et de janvier-février 2018, afin d'améliorer les connaissances concernant les impacts, dépendances et défaillances en cascade au sein de ceux-ci. Le diagnostic établi a également permis de préciser les besoins prévisibles quant à la mise en œuvre d'une démarche d'identification et de modélisation des effets cascade plus substantielle.

#### Limites du travail accompli et perspectives pour la poursuite des recherches

Le travail accompli dans le cadre de cette thèse connaît plusieurs limites, soulevées ici. Le choix de placer la vulnérabilité au centre des réflexions, et plus particulièrement la dimension relative aux dépendances, peut tout d'abord être remis en question. Ce choix a cependant permis de délimiter efficacement notre sujet, à savoir l'étude et la modélisation des relations de dépendances et des défaillances en cascade au sein des réseaux techniques urbains. La résilience a alors plutôt été considérée comme un cadre de pensée général. Les aléas, de même que les solutions palliatives ou les modalités de gestion de crise, ont été considérées au départ comme des données d'entrée afin de faciliter la généralisation, car ces éléments constituent d'autres dimension de la vulnérabilité des réseaux urbains. Mais ceux-ci peuvent avoir une influence forte au niveau des impacts engendrés et l'aléa crue a d'ailleurs été mis au centre des réflexions sur notre cas d'application de l'agglomération parisienne.

Il apparaît également que la mise en place d'un processus réfléchi d'analyse des besoins et de diagnostic des contextes opérationnels pour le choix et le développement d'une démarche centralisée ne semble pas incarner actuellement un enjeu majeur pour certaines parties prenantes, notamment les opérateurs de réseaux. On souligne une importante inertie au sein de ces organisations, celles-ci ayant de nombreux chantiers en parallèle et disposant de moyens limités. Et ce, alors même que la gestion des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade au sein des réseaux techniques urbains participe à l'amélioration de la résilience urbaine, que ce soit d'un point de vue scientifique, technique, organisationnel ou politique. Il s'avère d'ailleurs que le choix d'une démarche est souvent lié aux contacts établis avec les développeurs de l'une ou l'autre des solutions existantes (qui deviennent généralement accompagnateurs de la démarche), sans qu'un état de l'art et un recueil des besoins ne soient réalisés.

Ce travail permet toutefois de réaliser les enjeux et les risques relatifs à l'inadéquation d'une démarche à son contexte de mise en œuvre, et de proposer des pistes pour garantir une meilleure adéquation. Il permet également de faciliter et d'accompagner la démarche d'état de l'art et de diagnostic pour les porteurs. La question du transfert des résultats de cette recherche vers des parties prenantes opérationnelles dans le cadre de processus d'initiation de démarches incarne toutefois une potentielle limite à ce travail, de même que les difficultés de collaboration faute d'obligations légales ou contractuelles et faute de modèle économique pour y allouer des ressources.

Il faut ici noter que l'état de l'art réalisé devra évoluer selon les développements récents ou à venir, qui pourront modifier le paysage des démarches visant l'étude des phénomènes d'(inter)dépendances et de défaillances en cascade. Comme cela a été discuté tout au long du manuscrit, les choix méthodologiques effectués sont également critiquables, que ce soit au niveau de l'établissement de l'échantillon, des dimensions d'analyse de l'état de l'art, de la construction de la grille d'analyse du contexte opérationnel, que de l'identification des profils-types.

La problématique de cette recherche et les questionnements soulevés n'ont pas été résolus dans leur intégralité, et des pistes d'approfondissement peuvent être identifiées pour la poursuite de ce travail. Celui-ci ne semble pas en l'état suffisant pour incarner une approche formelle et intégrée d'aide à la décision quant au choix d'une démarche adaptée à un contexte donné, mais peut constituer la première étape vers une telle réalisation. Ce travail se révèle cependant extrêmement complexe, notamment de par sa multi-dimensionnalité : la question du choix relève à la fois de questions organisationnelles, techniques, géographiques, politiques, règlementaires...

Par ailleurs, le travail au niveau de l'agglomération parisienne pourrait être poursuivi et consolidé. Nous n'avons notamment pas eu le temps et l'occasion de collecter des retours officiels et formalisés de la part des parties prenantes opérationnelles au sujet des propositions effectuées. En se fondant sur les besoins prévisibles identifiés quant à la mise en œuvre d'une démarche d'identification et de modélisation des effets cascades plus substantielle, un processus de co-construction et de collaboration ambitieux pourrait être lancé avec les parties prenantes pour permettre le choix d'un porteur et d'objectifs prioritaires.

Ces expérimentations basées sur nos recommandations pourraient alors permettre de confronter celles-ci à la réalité opérationnelle et à les préciser. Une application à d'autres terrains d'étude pourrait également permettre de tester la répliquabilité de la méthodologie du diagnostic et de compléter l'analyse des contextes opérationnels au niveau des processus de mise en œuvre.

D'autres questions de recherche plus larges seraient également à approfondir. Les questions de réglementation et d'instrumentation des réseaux (mise en place d'instruments de mesure, de capteurs, de régulateurs dans le cadre d'un système d'acquisition de données ou de commande) pourraient notamment apporter des éléments d'analyse intéressants. On s'aperçoit en effet que la question des obligations réglementaires ou contractuelles des différents acteurs, notamment des opérateurs de réseaux, est centrale pour l'implication de ceux-ci. Se pose alors à nouveau la question du portage et de la gestion, dans le cadre du lancement mais aussi du maintien sur le long-terme, de ce type de démarche.

La question du suivi en temps réel et du télécontrôle des réseaux – potentiellement contradictoire avec la vision « verte », « résiliente » et « sobre » des villes de demain - est quant à elle au cœur de nombreuses démarches analysées. Ces solutions offrent des opportunités intéressantes notamment à travers les outils métiers développés par différents opérateurs. On note toutefois -avec une certaine ironie- que ces processus sont alors dépendants de dispositifs d'instrumentation, eux-mêmes généralement dépendants de l'alimentation électrique et des services de télécommunications...

# | BIBLIOGRAPHIE

- Agence de l'Eau Seine-Normandie. (2013). *Etat de les lieux 2013 du bassin de la Seine et des cours d'eau côtiers normands*. [Etat des lieux du comité de bassin]. Agence de l'Eau.
- Ahuir, G. (2016). *Gestion de crise: l'appropriation territoriale à l'épreuve des faits* [PhD Thesis]. Paris 1.
- Alsubaie, A., Di Pietro, A., Marti, J., Kini, P., Lin, T. F., Palmieri, S., & Tofani, A. (2013). A platform for disaster response planning with interdependency simulation functionality. *International Conference on Critical Infrastructure Protection*, 183–197.
- Ambroise-Rendu, M. (1997). 1910: La Seine en crue paralyse la capitale. *La Houille Blanche*, 8, 40–44.
- Antoni, J.-P., Morency, C., Cambien, A., Vuidel, G., Nguyen-Luong, D., Nicolas, J.-P., Piron, V., Delons, J., Bonnafous, A., & Crozet, Y. (2011). *Modéliser la ville*. Economica.
- Antonioni, G., Spadoni, G., & Cozzani, V. (2009). Application of domino effect quantitative risk assessment to an extended industrial area. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22(5), 614–624.
- Apostolakis, G. E., & Lemon, D. M. (2005). A screening methodology for the identification and ranking of infrastructure vulnerabilities due to terrorism. *Risk Analysis*, 25(2), 361–376.
- APUR. (2017). *Carte 2017 des intercommunalités en Ile-de-France*. <https://www.apur.org/fr/nos-travaux/carte-intercommunalites-ile-france>
- Ash, J., & Newth, D. (2007). Optimizing complex networks for resilience against cascading failure. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 380, 673–683. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2006.12.058>
- Association Espaces. (2013). *Diagnostic de territoire - Partie assainissement* (p. 49).
- Auerswald, P. E., Branscomb, L. M., Porte, T. M. L., & Michel-Kerjan, E. O. (2006). *Seeds of Disaster, Roots of Response: How Private Action Can Reduce Public Vulnerability*. Cambridge University Press.
- Awekidian, D.-M. (2013). *Le partage d'informations confidentielles sur une plateforme web dédiée aux interdépendances entre les infrastructures essentielles*. [Mémoire de Maîtrise Es Sciences Appliquées, Département de Mathématiques et de Génie Industriel.]. Ecole Polytechnique de Montréal.
- Azzouz, S., Bourgogne, J.-P., & Minot, J.-C. (2017). *Risque d'inondations dans les départements d'Ile-de-France - Enjeux d'Orange sur les TRI de la métropole francilienne et de Meaux*.
- Bambara, G., Peyras, L., Felix, H., & Serre, D. (2015). Developing a functional model for cities impacted by a natural hazard: application to a city affected by flooding. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 15(3), 603–615. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-603-2015>
- Bambrough, R. (1964). Principia metaphysica. *Philosophy*, 39(148), 97–109.
- Barreiro, J., Bocquentin, M., Colclough, G., Canalias, M., Ferreira, F., Fontanals, I., Lopes, R., Matos, J. S., Soler, P., Velasco, M., Vendrell, E., Vuillet, M., & Beiro, V. (2017). *Report from HAZUR®*



- implementation in each city* (Livrable Du Projet H2020 RESCCUE D4.1.; Resilience to Cope with Climate Change in Urban Areas - a Multisectorial Approach Focusing on Water).
- Beraud, H. (2013). *Initier la résilience du service de gestion des déchets aux catastrophes naturelles : le cas des territoires urbains et de l'inondation* [Phdthesis, Université Paris-Est]. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00874408/document>
- Bernard, T., & Piller, O. (2017, September 15). *Augmented Resilience of Water Distribution Systems following Severe Abnormal Events* [Présentation PowerPoint]. Workshop Interdisciplinaire sur la Sécurité Globale, Université Jussieu.
- Beucher, S. A. du texte, & Reghezza-Zitt, M. (2008). *Gérer le risque dans une métropole : le système français face à l'inondation dans l'agglomération parisienne*. <https://doi.org/10.7202/019217ar>
- Beyer, U., Cohnitz, S., Stachowiak, J., Usov, A., Rome, E., Beyel, C., Börding, J., & Luijff, E. (2010). *DIESIS D4.1b Final Architectural Design*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3476.9125>
- Blancher, P. (1998). *Risques et réseaux techniques urbains* (p. 170). CERTU - CEREMA.
- Bocquentin, M. (2019). *Enquête : les réseaux techniques urbains de l'agglomération parisienne face à une crue*. EIVP.
- Bocquentin, M., Vuillet, M., Cariolet, J.-M., Diab, Y., & Fontanals, I. (2020, March 9). *Identifying and modelling interdependencies and cascading failures between critical urban services: Hazur approach within a state of the art*. Urban Resilience in a Context of Climate Change, Barcelona.
- Bocquentin, M., Vuillet, M., Cariolet, J.-M., Lhomme, S., & Diab, Y. (2020). Vers une meilleure estimation des défaillances en cascade au sein des réseaux franciliens interdépendants face aux crues majeures. *La Houille Blanche*, 1, 70–78. <https://doi.org/10.1051/lhb/2020009>
- Bocquentin, M., Vuillet, M., Cariolet, J.-M., Lhomme, S., Pottier, N., & Diab, Y. (2018, November 14). Etude des (inter)dépendances et des défaillances en cascade au sein des réseaux urbains : le cas d'une crue de la Seine en Ile-de-France. *Colloque de la Société Hydrotechnique de France*. De la prévision des crues à la gestion de crise, Avignon.
- Bocquentin, M., Vuillet, M., Lhomme, S., Cariolet, J.-M., & Diab, Y. (2018, March 27). Application de l'AMDE pour l'étude des (inter)dépendances et des défaillances en cascade entre les infrastructures et réseaux techniques urbains. Expérimentation sur les retours d'expériences : formalisme et langage commun. *10èmes Journées Fiabilité Des Matériaux et Des Structures*. 10èmes journées Fiabilité des Matériaux et des Structures, Bordeaux.
- Bouchon, S. (2011). *L'identification des infrastructures critiques: réflexion à partir de l'exemple européen* [PhD Thesis]. Paris 10.

- Bram, S., Degerman, H., Eriksson, K., Vylund, L., Amon, F., Ronchi, E., Uriz, F. N., Criel, X., Reilly, P., Van Heuverswyn, K., & Bruggemans, B. (2016). *Decision-making and human behavior in emergencies with cascading effects* [Livrable D.2.3. du projet FP7 Casceff].
- Bris, C. L., & Coutard, O. (2008). Les réseaux rattrapés par l'environnement ? Développement durable et transformations de l'organisation des services urbains. *Flux*, n° 74(4), 6–8.
- Buldyrev, S. V., Parshani, R., Paul, G., Stanley, H. E., & Havlin, S. (2010). Catastrophic cascade of failures in interdependent networks. *Nature*, 464(7291), 1025–1028. <https://doi.org/10.1038/nature08932>
- Bureau de l'Urbanisme - Ville de Paris. (2007). *Plan de Prévention des Risques d'Inondation du département de Paris révisé* (p. 13) [Rapport de présentation]. Préfecture de la région Ile-de-France.
- Bush, B., Dauelsberg, L., Leclaire, R., Powell, D., Deland, S., & Samsa, M. (2005a). *Critical Infrastructure Protection Decision Support System (CIP/DSS) Project Overview*. Los Alamos National Laboratory.
- Bush, B., Dauelsberg, L., Leclaire, R., Powell, D., Deland, S., & Samsa, M. (2005b). Critical Infrastructure Protection Decision Support System (CIP/DSS) Project Overview. *Proceedings of the 23rd International Conference of the System Dynamics Society*, 2703–2714.
- Bush, Brian, Dauelsberg, L., LeClaire, R., Powell, D., DeLand, S., & Samsa, M. (2005). *3 critical infrastructure protection decision support system (cip/dss) project overview*.
- Buzna, L., Peters, K., Ammoser, H., Kühnert, C., & Helbing, D. (2007). Efficient response to cascading disaster spreading. *Physical Review E*, 75(5), 056107.
- Carpenter, S., Walker, B., Anderies, J. M., & Abel, N. (2001). From metaphor to measurement: resilience of what to what? *Ecosystems*, 4(8), 765–781.
- Casalicchio, E., & Galli, E. (2008). Metrics for quantifying interdependencies. *International Conference on Critical Infrastructure Protection*, 215–227.
- Livre vert sur un programme européen de protection des infrastructures critiques, Texte E 3016 - COM (2005) 576 final (2005), Examen dans le cadre de l'article 88-4 de la Constitution. <https://www.senat.fr/ue/pac/E3016.html>
- CCPS. (1999). *Guidelines for chemical process quantitative risk analysis*. American Institute of Chemical Engineers.
- CCR. (2016). *Inondations de mai-juin 2016 en France. Modélisation de l'aléa et des dommages*. (p. 21). Service R&D modélisation - Direction des Réassurances et Fonds Publics - Caisse Centrale de Réassurance.

- CCR. (2018). *Retour sur les inondations de janvier et février 2018. Modélisation des dommages et évaluation des actions de prévention.* (p. 23) [Retour d'expérience]. Caisse Centrale de Réassurance.
- Cedergren, A., & Johansson, J. (2017). *Cascading effects : what are they, and how do they affect society ?*
- CEPRI. (2016). *Le territoire et ses réseaux techniques face au risque d'inondation* (p. 88) [Les guides du CEPRI]. CEPRI.
- CGEDD. (2013). *Vulnérabilité des réseaux d'infrastructures aux risques naturels.* (Rapport du Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable No. 008414-01; p. 102). CGEDD. [http://cgedd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/document.xsp?id=Cgpc-CGEUV00216132&n=3&q=%28%2B%28question\\_word%3Areseaux+question%3A%7Cr%3%A9seaux%7C%29+%2Borganisme\\_mot%3Acgedd+%2Bdate%3A%5B2013-01-01+TO+2013-12-31%5D%29&fulltext=&depot=&](http://cgedd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/document.xsp?id=Cgpc-CGEUV00216132&n=3&q=%28%2B%28question_word%3Areseaux+question%3A%7Cr%3%A9seaux%7C%29+%2Borganisme_mot%3Acgedd+%2Bdate%3A%5B2013-01-01+TO+2013-12-31%5D%29&fulltext=&depot=&)
- CGEDD. (2017). *Inondations de mai et juin 2016 dans les bassins moyens de la Seine et de la Loire. Retours d'expérience.* (Rapport CGEDD n° 010743-01; p. 101). CGEDD.
- CGEDD. (2018). *Crue de la Seine et de ses affluents de janvier-février 2018. Retour d'expérience.* (Retour d'expérience Rapport CGEDD n°012268-01, IGA n°18037R; p. 131). CGEDD ET IGA.
- Chelleri, L., & Fontanals, L. (2014). *Exploring the vulnerability and resilience of urban Infrastructures and services supply: evidences from case studies using the Hazur method.* [Présentation PowerPoint]. Resilient Cities 2014.
- Clinton, W. J. (1995). *US Policy on Counter Terrorism* (Presidential Decision Directive No. 39). White House.
- Cochery, R. (2019). *Définition d'une plateforme SIG d'échange d'informations en gestion de crise* [Livrable du projet ANR RGC4]. EIVP.
- Code de la défense.* | *Legifrance.* (n.d.). Retrieved November 29, 2019, from <https://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do?cidTexte=LEGITEXT000006071307>
- Comes, T., & Van de Walle, B. (2014). Measuring disaster resilience: The impact of hurricane sandy on critical infrastructure systems. *Proceedings of the 11th International ISCRAM Conference, 11,* 195–204.
- Conrad, S. H., LeClaire, R. J., O'Reilly, G. P., & Uzunalioglu, H. (2006). Critical national infrastructure reliability modeling and analysis. *Bell Labs Technical Journal, 11*(3), 57–71.
- Consortium Casceff. (2018). *Méthodologie de modélisation des dépendances et des effets cascades pour la gestion d'urgence en situation de crise.*
- Council, N. R., Studies, D. on E. and L., Resources, B. on E. S. and, Committee, G. S., & Resilience, C. on P.-P. S. C. to E. C. D. (2011). *Building Community Disaster Resilience Through Private-Public Collaboration.* National Academies Press.

- Coutard, O., & Rutherford, J. (2009). Les réseaux transformés par leurs marges : développement et ambivalence des techniques « décentralisées ». *Flux*, n° 76-77(2), 6–13.
- Cozzani, V., Antonioni, G., & Spadoni, G. (2006). Quantitative assessment of domino scenarios by a GIS-based software tool. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19(5), 463–477.
- Curt, C., & Tacnet, J.-M. (2018). Resilience of Critical Infrastructures: Review and Analysis of Current Approaches. *Risk Analysis*, 38(11), 2441–2458. <https://doi.org/10.1111/risa.13166>
- Dabaj, A., Vuillet, M., Cariolet, J.-M., Diab, Y., Gache, F., & Jouannic, G. (2020, September). *Building Back Better Critical Infrastructures in a flooding context: Proposal of an operational approach*. FLOODrisk, Budapest.
- Dahmann, J. S., & Morse, K. L. (1998). High Level Architecture for simulation: an update. *Proceedings. 2nd International Workshop on Distributed Interactive Simulation and Real-Time Applications (Cat. No.98EX191)*, 32–40. <https://doi.org/10.1109/DISRTA.1998.694563>
- Daniel, J. (2017a). *Quels enseignements tirer des retours d'expériences d'évènements d'inondation pour améliorer la résilience des réseaux urbains du Grand Paris ?* (p. 154) [Mémoire de Master 2]. EIVP et UVSQ.
- Daniel, J. (2017b). *Quels enseignements tirer des retours d'expériences d'évènements d'inondation pour améliorer la résilience des réseaux urbains du Grand Paris ?* [Rapport de stage].
- Daniel, J. (2017c). *Retour d'expérience des inondations en Ile-de-France au printemps 2016*. (p. 40) [Rapport de synthèse réalisé à partir de données publiques]. EIVP et UVSQ.
- Dauphiné, A. (2003). *Les théories de la complexité chez les géographes*. Economica.
- De Porcellinis, S., Oliva, G., Panzieri, S., & Setola, R. (2009). A holistic-reductionistic approach for modeling interdependencies. *International Conference on Critical Infrastructure Protection*, 215–227.
- De Porcellinis, S., Panzieri, S., & Setola, R. (2009). Modelling critical infrastructure via a mixed holistic reductionistic approach. *International Journal of Critical Infrastructures*, 5(1–2), 86–99.
- Deltares. (2018). *Circle - Critical Infrastructures : relations and consequences for life and environment. An interactive touch table application for cascading effects analyses*.
- D'Ercole, R., & Metzger, P. (2009). La vulnérabilité territoriale : une nouvelle approche des risques en milieu urbain. *Cybergeo : European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.22022>
- Di Pietro, A., Liberto, C., Flourentzou, N., Kyriakides, E., Pothof, I., & Valenti, G. (2017). Physical simulators of Critical Infrastructures. In *Managing the complexity of Critical Infrastructures. A modeling and simulation approach*. (Springer Open, pp. 63–83). Springer.
- Diab, Y., & Landau, B. (2017). *Le génie urbain revisité. Innovations / Expérimentations*. (Presse des Ponts).

- DRIEE. (2015). *Plan de Gestion des Risques d'Inondation (PGRI) 2016-2021 du bassin Seine Normandie*. DRIEE Ile-de-France.
- DRIEE IDF. (2012). *Les scénarios de crue en région Ile-de-France*. (p. 22) [Notice d'utilisation.]. Service de la prévention des risques et des nuisances. Pôle connaissance des aléas naturels.
- DRIEE IDF. (2013). *Etat d'avancement des PPRI au 01/01/2013*. Carmen. [http://carmen.developpement-durable.gouv.fr/18/Avancement\\_PPR\\_Inondation.map](http://carmen.developpement-durable.gouv.fr/18/Avancement_PPR_Inondation.map)
- DRIEE IDF. (2016). *Episodes de crue de mai-juin 2016 sur le bassin de la Seine. Rapport de retour d'expérience*. (p. 92). Service de la prévention des risques et des nuisances. Pôle hydrologie et prévision des crues.
- DRIEE IDF. (2017, October 13). *TRI de la Métropole francilienne*. [driee.ile-de-france. http://www.driee.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/tri-de-la-metropole-francilienne-a3225.html](http://www.driee.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/tri-de-la-metropole-francilienne-a3225.html)
- DRIEE IDF. (2018). *Charte d'engagement pour "concevoir des quartiers résilients" face au risque d'inondation*.
- DRIEE IDF, Préfecture de Police, Zone de Défense, ERDF, RTE, GRDF, GRTGaz, RATP, SNCF, SGP, Eau de Paris, SIAAP, Véolia Eau, Suez Eau France, Orange, Numéricable-SFR, Bouygues Télécom, Ville de Paris, CD Hauts-de-Seine, ... EPTB Entente Oise Aisne. (2016). *Déclaration d'intention*.
- DRIEE IDF, & SGZDS. (2016). *Stratégie locale de gestion des risques d'inondation. TRI « Métropole francilienne »*. (p. 99). Direction régionale et interdépartementale de l'environnement et de l'énergie d'Ile-de-France & Secrétariat Général de la Zone de Défense et de Sécurité de Paris.
- Duflos, S., Diallo, A. A., & Le Grand, G. (2007). An overlay simulator for interdependent critical information infrastructures. *2nd International Conference on Dependability of Computer Systems (DepCoS-RELCOMEX'07)*, 27–34.
- Durand, D. (2006). *La Systémique* (10ème édition). Editions Liaisons.
- Dutozia, J. (2013). *Espaces à enjeux et effets de réseaux dans les systèmes de risques* [Phdthesis, Université Nice Sophia Antipolis]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00785772/document>
- Edjossan-Sossou, A.-M. (2019). *Quelle exploitation des résultats de CasCEff dans RGC4 ?*
- Edjossan-Sossou, A.-M., Vuillet, M., Mehdizadeh, R., & Deck, O. (2019, October 18). An agent-based model for simulating households' self-evacuation decision in high-rise buildings under critical infrastructures failures induced by a slow-onset flood conditions – a case study in Paris. *The 10th Conference of the International Society for Integrated Disaster Risk Management*. IDRIM, Nice.
- Ekman, O., & Lange, D. (2014). *Report of incident management in crisis*. (Livrable Du Projet FP7 CASCEFF D1.2.; Modeling of Dependencies and Cascading Effects for Emergency Management in Crisis Situations.).

- ERDF - IDF Est. (2015). *Plan de Protection Contre les Inondations (PPCI)* (p. 44). ERDF.
- European Council Directive 2008/114/EC of 8 December 2008 on the Identification and Designation of European Critical Infrastructures and the Assessment of the Need to Improve their Protection, 2008/114/EC (2008).
- Eusgeld, I., Nan, C., & Dietz, S. (2011a). "System-of-systems" approach for interdependent critical infrastructures. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(6), 679–686.
- Eusgeld, I., Nan, C., & Dietz, S. (2011b). "System-of-systems" approach for interdependent critical infrastructures. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(6), 679–686.
- Evans, B., Djordjevic, S., & Chen, S. (2018). *Development of methodologies for modelling of cascading effects and translating them into sectorial hazards - RESCCUE Deliverable D3.3*. (Livrable du projet H2020 RESCCUE D.3.3.). University of Exeter.
- Exercice Sequana 15 | La préfecture et les services de l'État en région Île-de-France*. (n.d.). Retrieved July 2, 2019, from <http://www.prefectures-regions.gouv.fr/ile-de-france/Actualites/Exercice-Sequana-15-18-anticiper-la-gestion-d-une-crue-majeure>
- Faist, K., & Junttila, K. (2017, March 16). *Application of SnowBall models and tools for cascading effects preparedness*. [Implementation of results and tools into practice]. Cascading effects conference, Bruxelles.
- FEMA. (2013). *Hurricane Sandy in New Jersey and New York : building performance observations, recommendations, and technical guidance* (p. 223) [Mitigation assessment team report]. Federal Emergency Management Agency.
- Flammini, F., Vittorini, V., Mazzocca, N., & Pragliola, C. (2009). A Study on Multiformalism Modeling of Critical Infrastructures. In R. Setola & S. Geretshuber (Eds.), *Critical Information Infrastructure Security* (pp. 336–343). Springer Berlin Heidelberg.
- Foglietta, C. (2013). *Critical Infrastructure Simulator by Interdependant Agents* [Présentation PowerPoint].
- Foglietta, C., Palazzo, C., Santini, R., & Panzieri, S. (2015). Assessing cyber risk using the CISIApro simulator. *International Conference on Critical Infrastructure Protection*, 315–331.
- Fontanals, L., Tricàs, J., Canalias, F., & Fontanals, I. (2014). Territorial resilience service management's vector study case in La Garrotxa. *Estudios Empresariales*, 144.
- Fotouhi, H., Moryadee, S., & Miller-Hooks, E. (2017). Quantifying the resilience of an urban traffic-electric power coupled system. *Reliability Engineering & System Safety*, 163, 79–94. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.01.026>
- Fujiki, K. (2017). *Etude prospective des impacts sociaux d'une inondation majeure en région Ile-de-France. Disparités socio-spatiales dans la prise en charge des populations franciliennes en situation de crise et post-crise : une analyse cartographiée et quantifiée des besoins des*

- ménages, de l'évacuation à la reconstruction* [Phdthesis, Université de Lyon (Université Jean Moulin Lyon 3)]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01760843/document>
- Galland, J.-P. (2010). Critique de la notion d'infrastructure critique. *Flux*, 3, 6–18.
- Gibbs, L. I., & Holloway, C. F. (2013). *Hurricane Sandy after action. Report and recommendations to Mayor Michael R. Bloomberg.* (p. 68) [Report and recommendations]. New York City Municipality.
- Givens, A. D., & Busch, N. E. (2013a). Realizing the promise of public-private partnerships in US critical infrastructure protection. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 6(1), 39–50.
- Givens, A. D., & Busch, N. E. (2013b). Realizing the promise of public-private partnerships in U.S. critical infrastructure protection. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 6(1), 39–50. <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2013.02.002>
- Glass Jr, R. J., Stamber, K. L., & Beyeler, W. E. (2004). *Advanced simulation for analysis of critical infrastructure: abstract cascades, the electric power grid, and Fedwire.* Sandia National Laboratories.
- Gleyze, J.-F. (2005). *La vulnérabilité structurelle des réseaux de transport dans un contexte de risques.* Université Paris-Diderot-Paris VII.
- Gonzva, M., Balsells, M., & Barroca, B. (2015). Mobilisation de l'analyse fonctionnelle pour l'étude de la résilience des quartiers et des systèmes de transport guidé face au risque inondation». *Techniques, Sciences, Méthodes*, 7–8, 64–75.
- Gonzva, Michaël. (2017). *Résilience des systèmes de transport guidé en milieu urbain: approche quantitative des perturbations et stratégies de gestion.* Université Paris-Est.
- Gorbil, G., & Gelenbe, E. (2009). Design of a mobile agent-based adaptive communication middleware to enable federations of critical infrastructure simulations. *4th Int'l Workshop on Critical Information Infrastructures Security (CRITIS'09), Bonn*, 145–160.
- Grangeat, A. (2017). *Vulnérabilité, résilience et effets cascade entre réseaux techniques : apports de la modélisation systémique et spatiale pour la planification et la gestion de crise au profit des opérateurs de réseau et de la sécurité civile.* [Thèse de doctorat]. Ecole des Mines de Saint-Etienne.
- Guarnieri, F., Travadel, S., Martin, C., Portelli, A., & Afrouss, A. (2015). *L'accident de Fukushima Dai Ichi - Le récit du directeur de la centrale. Volume 1 : L'anéantissement.* Presses des Mines. <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-01120574>
- Gueben-Venière, S. (2017). Les ateliers collaboratifs, un outil de recueil collectif des représentations spatiales ? Exemple appliqué au cas de la gestion d'une crise liée à une crue majeure de la Seine en Île-de-France. *EchoGéo*, 41. <https://doi.org/10.4000/echogeo.15103>

- Gueben-Veniere, S. (2019). *Il est temps de cartographier les crises*. <https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-02025006>
- Gursesli, O., & Desrochers, A. A. (2003). Modeling infrastructure interdependencies using Petri nets. *Systems, Man and Cybernetics, 2003. IEEE International Conference On, 2*, 1506–1512.
- Haavisto, I., Banomyong, R., Kovács, G., & Spens, K. (2013). Supply chain co-ordination in cascading disasters. *MLB Conference*.
- Haimes, Y. Y., Horowitz, B. M., Lambert, J. H., Santos, J. R., Lian, C., & Crowther, K. G. (2005). Inoperability input-output model for interdependent infrastructure sectors. I: Theory and methodology. *Journal of Infrastructure Systems, 11(2)*, 67–79.
- Hakiri, A. (2010). Etude des applications de Simulation Distribuée Interactive et l’algorithme Dead Reckoning. *CONF EDSYS*, 103.
- Hamden, R. (2017). *Entretien téléphonique* [Personal communication].
- Haraguchi, M., & Kim, S. (2014a). *Critical infrastructure systems: a case study of the interconnectedness of risks posed by hurricane sandy for new york city*.
- Haraguchi, M., & Kim, S. (2014b). Critical infrastructure systems: a case study of the interconnectedness of risks posed by hurricane sandy for new york city. *United Nation Office for Disaster Risk Reduction. “Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction.” Accessed September, 8, 2016*.
- Hassel, H., Johansson, J., Cedergren, A., Svergrup, L., & Arvidsson, B. (2015). *Method to study cascading effects* (Livable Du Projet FP7 CASCEFF D2.1.; Modeling of Dependencies and Cascading Effects for Emergency Management in Crisis Situations.).
- Helbing, D. (2013). Globally networked risks and how to respond. *Nature, 497(7447)*, 51.
- Hilly, G., Vojinovic, Z., Weesakul, S., Sanchez, A., Hoang, D. N., Djordjevic, S., Chen, A. S., & Evans, B. (2018). Methodological Framework for Analysing Cascading Effects from Flood Events: The Case of Sukhumvit Area, Bangkok, Thailand. *Water, 10(1)*, 81.
- Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics, 4(1)*, 1–23.
- Hollnagel, E., Nemeth, C. P., & Dekker, S. (2008). *Resilience Engineering Perspectives, Volume 1: Remaining sensitive to the possibility of failure*. Ashgate.
- Hopkinson, K. M., Birman, K. P., Giovanini, R., Coury, D. V., Wang, X., & Thorp, J. S. (2003). Distributed simulation in manufacturing: EPOCHS: integrated commercial off-the-shelf software for agent-based electric power and communication simulation. *Proceedings of the 35th Conference on Winter Simulation: Driving Innovation*, 1158–1166.
- INSEE. (2017). *Panorama statistique - Ile-de-France*. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2018915>



- INSEE. (2018). *Comparateur de territoire - Unité urbaine de Paris (00851). Etat civil en géographie au 01/01/2018*.
- IVT, E. Z. (2017). *OpenTrack overview*. [PDF].
- Johansson, J., & Hassel, H. (2010). An approach for modelling interdependent infrastructures in the context of vulnerability analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 95(12), 1335–1344.
- Juffé, M. (2013). La résilience: de quoi, à quoi et pour quoi? *Annales Des Mines-Responsabilité et Environnement*, 7–11.
- Kadri, F., Châtelet, E., & Birregah, B. (2011). Analyse d'Effet Domino: Méthodes et Outils. *Workshop Interdisciplinaire Sur La Sécurité Globale*, 1–15.
- Kélada, J. (1994). *L'AMDEC* (p. 17). École des Hautes Études Commerciales - Centre d'études en qualité totale.
- Kenward, A., Yawitz, D., & Raja, U. (2013). *Sewage overflows from hurricane Sandy*. Climate Central.
- Klaver, M. H., van Buul, K., Nieuwenhuijs, A. H., Luijff, H. A. M., Hakkarainen, T., Kling, T., Eid, M., Barbarin, Y., & Szulejewski, M. (2016). *Methodology for the identification and probability assessment of cascading effects* (Livraison du projet FP7 PREDICT D3.1.).
- Krob, D. (2014). Éléments de systémique. Architecture des systèmes. In J.-L. Petit & A. Berthoz (Eds.), *Complexité-Simplexité*. Collège de France. <http://books.openedition.org/cdf/3388>
- Kröger, W., & Zio, E. (2011). *Vulnerable systems*. Springer Science & Business Media.
- Kunz, M., Mühr, B., Kunz-Plapp, T., Daniell, J. E., Khazai, B., Wenzel, F., Vannieuwenhuysse, M., Comes, T., Elmer, F., & Schröter, K. (2013). Investigation of superstorm Sandy 2012 in a multi-disciplinary approach. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(10), 2579–2598.
- Kyriakides, E., & Polycarpou, M. (2014). *Intelligent Monitoring, Control, and Security of Critical Infrastructure Systems*. Springer.
- Lair, J. (2000). *Evaluation de la durabilité des systèmes constructifs du bâtiment*. Clermont Ferrand 2.
- Laker, L. (2018). *XDI Sydney: Integrated infrastructure analysis for Australia's largest city*. XDI systems. <https://static1.squarespace.com/static/572940b222482eafc95799fc/t/591064ab1e5b6c8e16fd29a0/1494246585172/CaseStudyXDISydney+RT3+KM1.pdf>
- Lamé, A. (2013). *Modélisation hydrogéologique des aquifères de Paris et impacts des aménagements du sous-sol sur les écoulements souterrains* [Thesis, Paris, ENMP]. <http://www.theses.fr/2013ENMP0071>
- Lange, D., Sjoström, J., & Honfi, D. (2015). *Loss and consequence of large scale incidents with cascading effects* (Livraison Du Projet FP7 CASCEFF D2.6.; Modeling of Dependencies and Cascading Effects for Emergency Management in Crisis Situations., p. 43). [http://casceff.eu/media2/2016/02/D2.6\\_loss\\_and\\_consequence\\_modelling\\_v2.pdf](http://casceff.eu/media2/2016/02/D2.6_loss_and_consequence_modelling_v2.pdf)

- Le Moigne, J.-L. (1974). *La théorie du système général: théorie de la modélisation*. Presses Universitaires de France.
- Lemesre, C. (2013). *Gestion des interdépendances reliées à l'utilisation des produits pétroliers*. [Mémoire de Maîtrise Es Sciences Appliquées, Département de Mathématiques et de Génie Industriel.]. Ecole Polytechnique de Montréal.
- Lew, H. (2011). *CIPMA: Critical Infrastructure Protection Modeling and Analysis*. [PowerPoint Presentation].
- 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* [Université Paris-Diderot-Paris VII]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00772204/>
- Lhomme, S., Serre, D., Diab, Y., & Laganier, R. (2010). Les réseaux techniques face aux inondations, ou comment définir des indicateurs de performance de ces réseaux pour évaluer la résilience urbaine (Urban networks and floods: how to define performance indicators to evaluate urban resiliency). *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, 87(4), 487–502.
- Lhomme, S., Serre, D., Diab, Y., & Laganier, R. (2011a). A methodology to produce interdependent networks disturbance scenarios. In *Vulnerability, Uncertainty, and Risk: Analysis, Modeling, and Management* (pp. 724–731). [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41170\(400\)88](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41170(400)88)
- Lhomme, S., Serre, D., Diab, Y., & Laganier, R. (2011b). *L'étude des effets dominos de systèmes fortement interdépendants à l'aide de méthodes de Sûreté de Fonctionnement*. <http://dspace.univ-tlemcen.dz/handle/112/506>
- Lhomme, S., Serre, D., Diab, Y., & Laganier, R. (2013). Analyzing resilience of urban networks: a preliminary step towards more flood resilient cities. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(2), 221–230.
- Lhomme, S., Vuillet, M., Cariolet, J.-M., & Del Mondo, G. (2019a). *Un outil d'aide à la décision pour la mobilité des personnels en période d'inondation en Ile-de-France : MOPPI*. TheoQuant, Besançon.
- Lhomme, S., Vuillet, M., Cariolet, J.-M., & Del Mondo, G. (2019b, January 22). Des outils d'aide à la décision pour faire face aux défis de la mobilité dans le cas de crues à cinétique lente. *Résilience et Adaptation Aux Catastrophes Naturelles*. 15ème rencontre Géorisque, Montpellier.
- Limousin, P. (2017). *Contribution à la scénarisation pédagogique d'exercices de crise* [PhD Thesis]. Lyon.
- Little, R. G. (2002). Controlling cascading failure: Understanding the vulnerabilities of interconnected infrastructures. *Journal of Urban Technology*, 9(1), 109–123.

- Liu, Z., Nadim, F., Garcia-Aristizabal, A., Mignan, A., Fleming, K., & Luna, B. Q. (2015). A three-level framework for multi-risk assessment. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 9(2), 59–74.
- LOI n° 2004-811 du 13 août 2004 de modernisation de la sécurité civile, 2004-811 (2004).
- Lönnemark, A., & Lange, D. (2016). *Project vision and approach* (Livable Du Projet FP7 CASCEFF D.6.9).
- Lönnemark, A., Lange, D., Amon, F., Criel, X., Verdel, T., Salmon, R., Van Heuverswyn, K., Maragos, G., Ackermans, R., Van Campen, S., Damen, J., Bruggemans, B., Contini, A., Lindström, P., Considine, T., Fridolf, K., & Judek, C. (2016). *Detailed description of selected scenarios* (Livable du projet FP7 CASCEFF D5.1.).
- Luijff, E., Nieuwenhuijs, A., & Klaver, M. (2008). *Critical infrastructure dependencies 1-0-1*. <https://doi.org/10.1109/INFRA.2008.5439621>
- Luijff, E., Nieuwenhuijs, A., Klaver, M., van Eeten, M., & Cruz, E. (2008). Empirical findings on critical infrastructure dependencies in Europe. *International Workshop on Critical Information Infrastructures Security*, 302–310.
- Luijff, H. A. M., Nieuwenhuijs, A. H., Klaver, M. H., Van Eeten, M. J., & Cruz, E. (2010). Empirical findings on European critical infrastructure dependencies. *International Journal of System of Systems Engineering*, 2(1), 3–18.
- Maillot, M., Flipo, N., & Rivière, A. (2018, October 5). *Fonctionnement hydrogéologique de l'agglomération parisienne*. Colloque du PIREN Seine, Paris.
- Marti, J. R. (2014, April 24). *Hybrid Engineering/Phenomenological Approach to Simulate a System of Systems*. [PowerPoint Presentation]. Modeling, Simulation and Analysis of Critical Infrastructure Master Class., UIC Headquarters, Paris.
- Marti, R., & Lepelletier, T. (1997). L'hydrologie de la crue de 1910 et autres grandes crues du bassin de la Seine. *La Houille Blanche*, 8, 33–39. <https://doi.org/10.1051/lhb/1997074>
- Masucci, V. (2012). Semantic interoperability among federated simulators of critical infrastructures—DIESIS project. *WIT Transactions on State-of-the-Art in Science and Engineering*, 54. <http://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-ecology-and-the-environment/54/23058>
- May, F. (2007). Cascading disaster models in postburn flash flood. In: *Butler, Bret W.; Cook, Wayne, Comps. The Fire Environment—Innovations, Management, and Policy; Conference Proceedings. 26-30 March 2007; Destin, FL. Proceedings RMRS-P-46CD. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. CD-ROM. p. 443-464, 46.*
- McAllister, T. (2014). The performance of essential facilities in Superstorm Sandy. *Structures Congress 2014*, 2269–2281.

- McDaniels, T., Chang, S., Peterson, K., Mikawoz, J., & Reed, D. (2007). Empirical framework for characterizing infrastructure failure interdependencies. *Journal of Infrastructure Systems*, 13(3), 175–184.
- McGee, S., Frittman, J., Ahn, S. J., & Murray, S. (2014). *Risk relationships and cascading effects in critical infrastructure: Implication for the Hyogo Framework* (p. 36) [Input paper of the 2015 Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction]. UNISDR.
- MEDD. (2005). *Réduire la vulnérabilité des réseaux urbains aux inondations* (p. 116) [Rapport du Ministère de l'Environnement et du Développement Durable]. Ministère de l'Environnement et du Développement Durable.
- MEDDE. (n.d.). *Prévention des inondations | Ministère de la Transition écologique et solidaire*. Retrieved August 19, 2019, from <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/prevention-des-inondations>
- MEDDE. (2004). *Les inondations - Dossier d'information - Risques naturels majeurs* (p. 24) [Rapport de la sous-direction de la Prévention des risques majeurs]. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable.
- Mérian, Y., Planchette, G., Lannoy, A., & Merad, M. (2018). *Approach And Systemic Approach For Risk Management* [Approche Analytique Et Approche Systemique Pour La Maitrise Des Risques Analytic] (hal-02065309; Post-Print). HAL. <https://ideas.repec.org/p/hal/journal/hal-02065309.html>
- Moatty, A., & Reghezza-Zitt, M. (2018). Infrastructures critiques, vulnérabilisation du territoire et résilience : assainissement et inondations majeures en Île-de-France. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement, Volume 18 Numéro 3*. <https://doi.org/10.4000/vertigo.23554>
- Mortureux, Y. (2005). *AMDE(C)*. Ed. Techniques Ingénieur. <https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=UwifjXqV438C&oi=fnd&pg=PA1&dq=mortureux+amde&ots=BSkLOWeAG0&sig=8WqsqV1kl8D2JaHsv3Z84TfiBJE>
- Murray-tuite, P. M. (2006). A Comparison of Transportation Network Resilience under Simulated System Optimum and User Equilibrium Conditions. *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*, 1398–1405. <https://doi.org/10.1109/WSC.2006.323240>
- Mustajoki, J., Hämäläinen, R. P., & Marttunen, M. (2004). Participatory multicriteria decision analysis with Web-HYPRE : a case of lake regulation policy. *Environmental Modelling & Software*, 537–547.
- Nan, C., & Eusgeld, I. (2011). Adopting HLA standard for interdependency study. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(1), 149–159.

- Nan, C., & Sansavini, G. (2017). A quantitative method for assessing resilience of interdependent infrastructures. *Reliability Engineering & System Safety*, 157, 35–53.
- NATO. (2007). *The Protection Of Critical Infrastructures* (Special Report 162 CDS 07 E rev. 1; p. 20). NATO Parliamentary Assembly.
- Necci, A., Cozzani, V., Spadoni, G., & Khan, F. (2015a). Assessment of domino effect: state of the art and research needs. *Reliability Engineering & System Safety*, 143, 3–18.
- Necci, A., Cozzani, V., Spadoni, G., & Khan, F. (2015b). Assessment of domino effect: State of the art and research Needs. *Reliability Engineering & System Safety*, 143, 3–18.
- Nieuwenhuijs, A., Luijff, E., & Klaver, M. (2008). Modeling Dependencies In Critical Infrastructures. *IFIP International Federation for Information Processing*, 290, 205–213. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-88523-0\\_15](https://doi.org/10.1007/978-0-387-88523-0_15)
- Nouaillhac-Pioch, & Maillat. (1910). *Monographie de la crue de janvier-février-mars 1910*. (p. 94). Commission des inondations.
- November, V., & Créton-Cazanave, L. (2017). *La gestion de crise à l'épreuve de l'exercice EU SEQUANA*.
- NSW Government. (2018, May 15). *Building resilience in public infrastructure through collaborative adaptation : XDi Sydney project* [PowerPoint Presentation]. Public Works Conference. <https://www.ipwea.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=07b1c559-7593-4242-e7ed-edd2f4d56cd0&forceDialog=0>
- OCDE. (2014a). *Etude de l'OCDE sur la gestion des risques d'inondation : la Seine en Ile-de-France*. OCDE.
- OCDE. (2014b). *Etude de l'OCDE sur la gestion des risques d'inondation : la Seine en Ile-de-France*. OCDE.
- OCDE. (2018). *Mieux prévenir les inondations de la Seine en Île-de-France : Progrès réalisés et enjeux pour l'avenir* [Éditions OCDE]. OCDE.
- Oger, F. (2012, October 25). *Resilis : un projet de recherche pour améliorer la résilience urbaine*. [Présentation PowerPoint].
- Oliva, G., Panzieri, S., & Setola, R. (2012). Modeling and simulation of critical infrastructures. *WIT Transactions on State-of-the-Art in Science and Engineering*, 54.
- Olsvik, A., Mehdizadeh, R., Deck, O., Edjossan-Sossou, A.-M., Judek, C., & Vuillet, M. (2018, March 27). *Modelling infrastructural cascade failure with multi-agent simulation : application to a case of flooding*. 10èmes journées Fiabilité des Matériaux et des Structures, Bordeaux.
- Ouyang, M. (2014). Review on modeling and simulation of interdependent critical infrastructure systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 121, 43–60.
- Palazzo, C. (2015). *CISIapro Guide*. <https://www.cisiapro.dia.uniroma3.it%2Fdownload%2Fcisiapro-guide%2F&usg=AOvVaw10duTHmG1q9GTscknt3ju0>

- Palumbo, E., Osella, M., Rizzo, G., Ferro, E., Zuccaro, G., Leone, M., & De Gregorio, D. (2016). SnowBall DSS: an ensemble Multi-Criteria Decision Support System encompassing cascading effects for disaster management. *International Conference on Decision Support System Technology Proceedings*. ICDSST 2016, Plymouth, Angleterre.
- Panzieri, S., Setola, R., & Ulivi, G. (2004). An agent based simulator for critical interdependent infrastructures. *Securing Critical Infrastructures, CRIS2004: Conference on Critical Infrastructures*, 25–27. [http://www.see.asso.fr/clubs\\_techniques/se/xmedia/Club\\_Tech\\_SE-2001-2008/2004/CRIS-Grenoble-10-04/S4/s4-a5.pdf](http://www.see.asso.fr/clubs_techniques/se/xmedia/Club_Tech_SE-2001-2008/2004/CRIS-Grenoble-10-04/S4/s4-a5.pdf)
- Panzieri, Stefano. (2012, April 25). *Impact Estimation: from questionnaires to interdependencies*. Workshop on Risk Assessment and Resilience for Critical Infrastructures, Ranco, Italie.
- Panzieri, Stefano, Setola, R., & Ulivi, G. (2005). An approach to model complex interdependent infrastructures. *IFAC Proceedings Volumes*, 38(1), 404–409.
- Directive 2007/60/CE du Parlement Européen et du Conseil du 23 octobre 2007 relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation, 2007/60/CE (2007).
- Pederson, P., Dudenhoeffer, D., Hartley, S., & Permann, M. (2006). *Critical Infrastructure Interdependency Modeling: A Survey of U.S. and International Research*. (p. 126). Idaho National Laboratory.
- Pellet, R. (2009). *Système expert de modélisation des effets domino entre réseaux de support à la vie* [Masters, École Polytechnique de Montréal]. <https://publications.polymtl.ca/203/>
- Perrow, C. (2011). *Normal Accidents: Living with High Risk Technologies* (Updated Edition). Princeton University press, first published in 1984 by Basic Books.
- Pescaroli, G., & Alexander, D. (2015). A definition of cascading disasters and cascading effects: Going beyond the “toppling dominos” metaphor. *Planet@Risk*, 3(1). <https://planet-risk.org/index.php/pr/article/view/208>
- Pescaroli, G., & Kelman, I. (2017). How critical infrastructure orients international relief in cascading disasters. *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 25(2), 56–67.
- Petit, FRÉDÉRIC. (2009). *Concepts d'analyse de la vulnérabilité des infrastructures essentielles: Prise en compte de la cybernétique*. Ecole Polytechnique de Montréal.
- Petit, Frederic, & Verner, D. (2016). Critical Infrastructure Interdependencies Assessment. *World Security Report, 2016*.
- Petit, Frédéric, Wallace, K., & Phillip, J. (2014). Interactive dependency curves for resilience management. *Journal of Business Continuity & Emergency Planning*, 8(2), 141–155.
- Petty, M., & Weiseil, E. (2003). A Composability Lexicon. *Proceedings of the Spring 2003 SISO*.
- Phillips, J., & Tompkins, A. (2014). *Resilience Metrics*. Quadrennial Energy Review Technical Workshop on Resilience Metrics for Energy Transmission and Distribution Infrastructure, USA.

- Picard, A. (1910). *Rapport général de M. Alfred Picard, président de la commission, à Monsieur le président du conseil, ministre de l'intérieur et des cultes.* (p. 87) [Retour d'expérience]. Commission des inondations.
- Piller, O., Sedehizade, F., Bernard, T., Braun, M., Cheifetz, N., Deuerlein, J., Wagner, M., Lapébie, E., Trick, I., Weber, J. M., & Werey, C. (2017, September 5). Augmented Resilience of Water Distribution Systems following Severe Abnormal Events. *Computing and Control for the Water Industry*. CCWI 2017 – Computing and Control for the Water Industry, Sheffield, England.
- Pitilakis, K., Crowley, H., & Kaynia, A. M. (2014). *SYNER-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Elements at Seismic Risk: Buildings, Lifelines, Transportation Networks and Critical Facilities*. Springer Science & Business Media.
- Pitilakis, Kyriazis. (n.d.). *Systemic seismic vulnerability and risk analysis for buildings, lifeline networks and infrastructures safety gain* [Présentation Powerpoint]. SYNER-G presentation. [http://www.vce.at/SYNER-G/pdf/download/D8.3\\_Slides.pdf](http://www.vce.at/SYNER-G/pdf/download/D8.3_Slides.pdf)
- Pitilakis, Kyriazis, Franchin, P., Khazai, B., & Wenzel, H. (Eds.). (2014). *SYNER-G: Systemic Seismic Vulnerability and Risk Assessment of Complex Urban, Utility, Lifeline Systems and Critical Facilities: Methodology and Applications*. Springer Netherlands. <https://www.springer.com/gp/book/9789401788342>
- Portante, E. C., Craig, B. A., Talaber, L. E., Kavicky, J. A., Folga, S. F., & Cedres, S. (2011). EPfast: A model for simulating uncontrolled islanding in large power systems. *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC)*, 1758–1769. <https://doi.org/10.1109/wsc.2011.6147891>
- Portante, E., Craig, B., Kavicky, J., Talaber, L., & Folga, S. (2016). Modeling Electric Power and Natural Gas Systems Interdependencies. *The CIP Report*. <https://cip.gmu.edu/2016/06/03/modeling-electric-power-natural-gas-systems-interdependencies/>
- Pottier, N., Daniel, J., & Vuillet, M. (2019). Analyse des retours d'expérience d'inondations majeures pour la résilience des réseaux urbains. *Retours d'expériences Post-Catastrophes Naturelles*. 13ème rencontre Géorisques 2017, Montpellier.
- Pottier, N., & Richardot, M. (2017). *Le Grand Paris face aux inondations. Etat des connaissances et des démarches engagées concernant la prise en compte des réseaux techniques dans la gestion de crise en cas d'inondation majeure de la Seine*. [Livrable du projet ANR RGC4]. EIVP et UVSQ.
- Predict Consortium. (2016). *Preparing for the domino effect in crisis situation. D.3.2. Methods of threat quantification*. (Livrable Du Projet FP7 PREDICT D.3.2.).
- Préfecture de la Seine-St-Denis. (2007). *Plan de Prévention du Risque Inondation de la Seine dans le département de Seine-St-Denis* (p. 32) [Rapport de présentation]. Vallée de la Seine.
- Préfecture de l'Essonne. (2003). *Plan de Prévention des Risques Naturels d'Inondation de la vallée de la Seine dans le département de l'Essonne* (p. 11) [Rapport de présentation]. Vallée de la Seine.

- Préfecture des Hauts-de-Seine. (2004). *Plan de Prévention des Risques d'Inondation de la Seine dans les Hauts-de-Seine* (p. 31) [Rapport de présentation]. Direction Départementale de l'Équipement.
- Proust, M. (1896). *Les Plaisirs et les Jours* (Calmann-Lévy).
- Puig, A., Canalias, M., Vendrell, E., Soler, P., & Fontanals, I. (2019). *HAZUR 1.2. user manual*.
- Rahman, H. A., Armstrong, M., Mao, D., & Marti, J. R. (2008). I2Sim: A matrix-partition based framework for critical infrastructure interdependencies simulation. *Electric Power Conference, 2008. EPEC 2008. IEEE Canada*, 1–8.
- RATP - Cellule Inondation. (2012). *Plan de Protection contre les Inondations de la RATP* (p. 90) [Version destinée aux pouvoirs publics]. RATP.
- Reed, M. S., Fraser, E. D., & Dougill, A. J. (2006). An adaptive learning process for developing and applying sustainability indicators with local communities. *Ecological Economics*, 59(4), 406–418.
- Reghezza, M. (2006). *Réflexions autour de la vulnérabilité métropolitaine: la métropole parisienne face au risque de crue centennale*. [PhD Thesis].
- Reghezza-Zitt, M. (2015). Territorialiser ou ne pas territorialiser le risque et l'incertitude. La gestion territorialisée à l'épreuve du risque d'inondation en Île-de-France. *L'Espace Politique. Revue en ligne de géographie politique et de géopolitique*, 26. <https://doi.org/10.4000/espacepolitique.3543>
- Reghezza-Zitt, M., Rufat, S., Djament-Tran, G., Le Blanc, A., & Lhomme, S. (2012). What resilience is not: uses and abuses. *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.25554>
- Reniers, G., & Cozzani, V. (2013). Features of escalation scenarios. In *Domino Effects in the Process Industries* (pp. 30–42). Elsevier.
- Rey, B. (2015). *Résilience systémique d'un Territoire composé d'Activités Essentielles suite à une perturbation majeure - Approches systémique et spatiale*. [Thèse de doctorat]. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.
- Richardot, M. (2016). *Etat des connaissances et des démarches engagées à prendre en compte dans la réduction de la vulnérabilité des réseaux urbains en petite couronne parisienne*. [Rapport de stage]. UVSQ - EIVP.
- Rijke, J., Farrelly, M., Brown, R., & Zevenbergen, C. (2013). Configuring transformative governance to enhance resilient urban water systems. *Environmental Science & Policy*, 25, 62–72. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2012.09.012>



- Rinaldi, S. M. (2004). Modeling and simulating critical infrastructures and their interdependencies. *System Sciences, 2004. Proceedings of the 37th Annual Hawaii International Conference On*, 8–pp.
- Rinaldi, S. M., Peerenboom, J. P., & Kelly, T. K. (2001). Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies. *IEEE Control Systems*, 21(6), 11–25.
- Rist, G. (2013). *Le Développement, Histoire d'une croyance occidentale*. Presses de Sciences Po. <http://www.pressdesciencespo.fr/fr/livre/?GCOI=27246100222830>
- Robert, Benoit. (2004). A method for the study of cascading effects within lifeline networks. *International Journal of Critical Infrastructures*, 1(1), 86–99.
- Robert, Benoît, & Morabito, L. (2009). *Réduire la vulnérabilité des infrastructures essentielles : guide méthodologique*. Lavoisier.
- Robert, Benoît, Morabito, L., Cloutier, I., & Hémond, Y. (2012). Interdependent critical infrastructures: from protection towards resilience. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 24, 70–79.
- Robert, Benoît, Morabito, L., & Debernard, C. (2013). Simulation and anticipation of domino effects among critical infrastructures. *International Journal of Critical Infrastructures*, 9(4), 275–303.
- Rome, E., Bologna, S., Gelenbe, E., Luijijf, E., & Masucci, V. (2009). *DIESIS : An interoperable european federated simulation network for critical infrastructures*. SISO European Simulation Interoperability Workshop (EURO SIW), Istanbul.
- Rose, A. Z. (2009). A framework for analyzing the total economic impacts of terrorist attacks and natural disasters. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 6(1).
- Rozel, Benoît. (2009). *La sécurisation des infrastructures critiques: recherche d'une méthodologie d'identification des vulnérabilités et modélisation des interdépendances* [Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG]. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-00407661/>
- Rozel, Benoit, Viziteu, M., Caire, R., Hadjsaid, N., & Rognon, J.-P. (2008). Towards a common model for studying critical infrastructure interdependencies. *Power and Energy Society General Meeting- Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*, 1–6. <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4596465/>
- RTE. (2019). *Carte du réseau RTE*. Rte-France. [https://rte-france.maps.arcgis.com/apps/Embed/index.html?webmap=02d413bcbe184384ba424fc40f9b8ce8&extent=-11.8692,40.3171,16.4975,52.9519&home=true&zoom=true&scale=true&legend=true&disable\\_scroll=false&theme=light](https://rte-france.maps.arcgis.com/apps/Embed/index.html?webmap=02d413bcbe184384ba424fc40f9b8ce8&extent=-11.8692,40.3171,16.4975,52.9519&home=true&zoom=true&scale=true&legend=true&disable_scroll=false&theme=light)
- Sargent, R. G. (2010). Verification and validation of simulation models. *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference*, 166–183.

- Schlobinski, S. (2015, June 4). *CRISMA Framework* [Présentation PowerPoint]. CRISMA Business Day, Bruxelles.
- Schwartz, M. (2013, April 30). Report Cites Large Release of Sewage From Hurricane Sandy. *The New York Times*. <https://www.nytimes.com/2013/05/01/nyregion/hurricane-sandy-sent-billions-of-gallons-of-sewage-into-waterways.html>
- Scott, G. (2007). *Overview of CIP in Australia, Risk and Impact Analysis*.
- Section de l'Assainissement Parisien. (2019). *Plan de Protection Contre les Inondations de l'assainissement de Paris - Version révisée* (p. 217). Ville de Paris.
- Seine Grands Lacs. (2019). *PAPI de la Seine et de la Marne franciliennes. Synthèse 2017-2019*. (p. 32). Etablissement Public Territorial de Bassin.
- Serre, D., Peyras, L., Curt, C., Boissier, D., & Diab, Y. (2007). Évaluation des ouvrages hydrauliques de génie civil. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(11), 1298–1313. <https://doi.org/10.1139/T07-084>
- Setola, R. (2010). How to measure the degree of interdependencies among critical infrastructures. *International Journal of System of Systems Engineering*, 2(1), 38–59.
- Setola, R., Luijff, E., & Theocharidou, M. (2017). Critical Infrastructures, Protection and Resilience. In *Managing the complexity of Critical Infrastructures. A modeling and simulation approach*. (Springer Open, pp. 1–18). Springer.
- Setola, R., Rosato, V., Kyriakides, E., & Rome, E. (2017). *Managing the complexity of critical infrastructures. A modelling and simulation approach*. (Springer, Vol. 90).
- Setola, R., & Theocharidou, M. (2017). Modelling dependencies between Critical Infrastructures. In *Managing the complexity of Critical Infrastructures. A modeling and simulation approach*. (Springer Open, pp. 19–42). Springer.
- Instruction générale interministérielle n° 6600/SGDSN/PSE/PSN relative à la sécurité des activités d'importance vitale (SAIV), n° 6600/SGDSN/PSE/PSN (2014).
- SGDSN. (2016). *La sécurité des activités d'importance vitale - Plaquette*.
- Sharif, A. M., & Irani, Z. (2006). Applying a fuzzy-morphological approach to complexity within management decision making. *Management Decision*, 44(7), 930–961.
- Stapelberg, R. F. (2008). Infrastructure systems interdependencies and risk informed decision making (RIDM): impact scenario analysis of infrastructure risks induced by natural, technological and intentional hazards. *Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics*, 6(5), 21–27.
- Stergiopoulos, G., Vasilellis, S., Lykou, G., Kotzanikolaou, P., & Gritzalis, D. (2016). Critical Infrastructure Protection tools: Classification and comparison. *Proc. of the 10th International Conference on Critical Infrastructure Protection*.
- Strogatz, S. H. (2001). Exploring complex networks. *Nature*, 410(6825), 268.

- Talon, A., Boissier, D., & Peyras, L. (2014). Méthodes qualitatives pour la sûreté de fonctionnement des structures et des ouvrages. *Fiabilité Des Matériaux et Des Structures. Analyse de Risques et Fiabilité Des Systèmes Dans Leur Environnement*. Journées de la Fiabilité des Matériaux et des Structures., Aix-en-Provence.
- Thoma, K. (2011). *European Perspectives on Security Research*. Springer Science & Business Media.
- Thouret, J.-C., & D'Ercole, R. (1996). Vulnérabilité aux risques naturels en milieu urbain : effets, facteurs et réponses sociales. *Cahiers Des Sciences Humaines. ORSTOM*, 32(2), 407–422.
- Tofani, A., D'Agostino, G., & Marti, J. R. (2017). Phenomenological Simulators of Critical Infrastructures. In *Managing the Complexity of Critical Infrastructures. A Modelling and Simulation Approach*. (Springer Open, Vol. 90, pp. 85–107). Springer.
- Torres, J. L. S. (2013). *Vulnerability, interdependencies and risk analysis of coupled infrastructures: power distribution network and ICT* [PhD Thesis]. Université de Grenoble.
- Toubin, M. (2014). *Améliorer la résilience urbaine par un diagnostic collaboratif, l'exemple des services urbains parisiens face à l'inondation* [Université Paris-Diderot - Paris VII]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00958279/document>
- Toubin, M., Diab, Y., Laganier, R., & Serre, D. (2013). Les conditions de la résilience des services urbains parisiens par l'apprentissage collectif autour des interdépendances. *Vertigo-La Revue Électronique En Sciences de l'environnement*, 13(3). <https://vertigo.revues.org/14568>
- Toubin, M., Laganier, R., Diab, Y., & Serre, D. (2014). Improving the conditions for urban resilience through collaborative learning of Parisian urban services. *Journal of Urban Planning and Development*, 141(4), 05014021.
- 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. Économie, Géographie, Politique, Droit, Sociologie*, 3(1). <https://developpementdurable.revues.org/9208>
- Tsavidaroglou, M., Al-Jibouri, S. H. S., Bles, T., & Halman, J. I. M. (2018). Proposed methodology for risk analysis of interdependent critical infrastructures to extreme weather events. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 21, 57–71. <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2018.04.002>
- UNISDR. (2009). *Terminology on Disaster Risk Reduction* [Lexique]. United Nations.
- UNISDR. (2015). *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030* (A/CONF.224/CRP.1.).
- United Nations. (2005). *Hyogo Framework for Action 2005–2015: building the resilience of nations and communities to disasters* (United Nations World Conference on Disaster Reduction). United Nations - UN.

- Van Eeten, M., Nieuwenhuijs, A., Luijff, E., Klaver, M., & Cruz, E. (2011). The state and the threat of cascading failure across critical infrastructures: the implications of empirical evidence from media incident reports. *Public Administration*, *89*(2), 381–400.
- van Ruiten, K., Bles, T., & Kiel, J. (2016). EU-INTACT-case studies: Impact of extreme weather on critical Infrastructure. *E3S Web of Conferences*, *7*, 07001. [http://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2016/02/e3sconf\\_flood2016\\_07001/e3sconf\\_flood2016\\_07001.html](http://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2016/02/e3sconf_flood2016_07001/e3sconf_flood2016_07001.html)
- Varesano, L. (2018). *Amélioration de la résilience des réseaux techniques de services urbains face aux inondations en IDF : vers une gestion territorialisée des risques et des crises*. (p. 147) [Rapport de stage de fin d'études]. CEMOTEV - Projet RGC4.
- Velasco, M. (n.d.). *RESCCUE -RESilienceto cope with Climate Change in Urban arEas. A multisectorial approach focusing on water. General brief presentation*. [Présentation PowerPoint].
- Velasco, M., Russo, B., Martínez, M., Malgrat, P., Monjo, R., Djordjevic, S., Fontanals, I., Vela, S., Cardoso, M., & Buskute, A. (2018). Resilience to cope with climate change in urban areas—A multisectorial approach focusing on water—The RESCCUE Project. *Water*, *10*(10), 1356.
- VEOLIA Eau Ile-de-France, & SEDIF. (2017). *Le ServO - Un centre de pilotage unique pour le service de l'eau du SEDIF* (p. 8) [Plaquette de présentation].
- Veyret, Y., & Laganier, R. (2013). *Atlas des risques en France : Prévenir les catastrophes naturelles et technologiques* (Autrement, Ed.). <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01235660>
- Vigicrués : Carte de vigilance crues nationale*. (n.d.). Retrieved July 22, 2019, from <https://www.vigicrués.gouv.fr/>
- Vuillemeur, A. (1997). *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels*. Eyrolles, EDF.
- Vuillet, M. (2020). *Rapport final du projet ANR RGC4* (p. 5) [Synthèse publique des résultats]. EIVP.
- Vuillet, M., Hathout, M., Peyras, L., Carvajal, C., Rakotondrazaka, L. H., Maiolo, P. D., Ferrer, L., Curt, C., & Diab, Y. (2018). Projet Incertu - incertitude et jugement expert pour l'aide à l'évaluation de la résilience des réseaux techniques urbains. *La Houille Blanche*, *4*, 27–33. <https://doi.org/10.1051/lhb/2018039>
- Wallace, W. A., Mendonça, D., Lee, E., Mitchell, J. E., & Chow, J. (2001). Managing disruptions to critical interdependent infrastructures in the context of the 2001 World Trade Center attack. *Impacts of and Human Response to the September 11, 2001 Disasters: What Research Tells Us*.
- Wang, J. (2013). *Vulnerability and risk analysis of the Guadeloupe Island for disaster scenarios using the modified I2SIM toolbox* [University of British Columbia]. <https://open.library.ubc.ca/collections/ubctheses/24/items/1.0073524>
- White House. (1998). *The Clinton's Administration's Policy on critical infrastructure protection*. (Presidential decision directive 63/PDD-63). <https://fas.org/irp/offdocs/pdd/pdd-63.htm>

- White House. (2013). *Presidential Policy Directive -- Critical Infrastructure Security and Resilience* (Presidential Policy Directive PPD-21). The White House.
- Wybo, J.-L. (2009). Le retour d'expérience : un processus d'acquisition de connaissances et d'apprentissage. In *Gestion de crise : le maillon humain au sein de l'organisation* (Economica, p. 19). Specht et Planchette.
- Wybo, J.-L., & Wassenhove, W. V. (2009). *Retour d'expérience et maîtrise des risques*. Technique & Documentation - Lavoisier. <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-00438148>
- Yusta, J. M., Correa, G. J., & Lacal-Aránzategui, R. (2011). Methodologies and applications for critical infrastructure protection: State-of-the-art. *Energy Policy*, *39*(10), 6100–6119.
- Zevenbergen, C., Veerbeek, W., Gersonius, B., & Van Herk, S. (2008). Challenges in urban flood management: travelling across spatial and temporal scales. *Journal of Flood Risk Management*, *1*(2), 81–88. <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2008.00010.x>
- Zimmerman, R. (2002). Enjeux et gestion des interactions entre les différents réseaux d'infrastructure. *Flux*, *1*, 54–68.
- Zimmerman, R., & Restrepo, C. E. (2009). Analyzing cascading effects within infrastructure sectors for consequence reduction. *Technologies for Homeland Security, 2009. HST'09. IEEE Conference On*, 165–170.
- Zio, E. (2018). The future of risk assessment. *Reliability Engineering & System Safety*, *177*, 176–190. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.04.020>
- Zio, Enrico, & Sansavini, G. (2011). Modeling interdependent network systems for identifying cascade-safe operating margins. *IEEE Transactions on Reliability*, *60*(1), 94–101.
- Zuccaro, G., De Gregorio, D., & Leone, M. F. (2018). Theoretical model for cascading effects analyses. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *30*, 199–215. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.04.019>
- Zuccarro, G. (2015). *Assessment of Cascading Effects : a tool for emergency preparedness*. Poster du projet CRISMA. [Poster].

# | ANNEXES

## 2. PORTRAITS DE NEUF DEMARCHES REPRESENTATIVES

### 1.1. Casceff

Tableau 62 : Présentation du projet Casceff

| CARACTERISTIQUE   | DESCRIPTION   |
|-------------------|---|
| Cadre et porteurs | Casceff a été développé dans le cadre d'un projet de recherche européen, au sein du programme de financement FP7 qui a couru jusqu'à la fin de l'année 2017. Ce projet s'intitule "Modelling of dependencies and cascading effects for emergency management in crisis situation". Il a été porté par le SP Technical Research Institute of Sweden, et comportait de nombreux partenaires suédois, anglais, belges, suisses, néerlandais et français (Institut National de l'Environnement et des Risques (INERIS) et Université de Lorraine).   |
| Objectifs         | <p>Le but de la méthode est de permettre une description systématique des caractéristiques clés des effets en cascade ayant eu lieu au cours d'événements passés. Il est principalement applicable à la description des effets en cascade. En outre, la méthode doit prendre en compte les effets de conditions permettant, aggravant, empêchant ou atténuant les effets en cascade. On peut donc identifier les objectifs suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• L'identification des liens d'(inter)dépendances</li> <li>• La formalisation de ces liens</li> <li>• La modélisation des relations</li> <li>• La représentation des scénarios induits (absence de réelle simulation)</li> </ul> |
| Aléas             | Tous les types d'aléas peuvent théoriquement être considérés, qu'ils soient naturels, accidentels ou intentionnels. Le feu a été étudié de façon plus poussée lors du développement.  |
| Objets            | Les secteurs pris en compte par le modèle CASCEFF s'inspirent et complètent différents secteurs identifiés par des institutions américaine et suédoise, et par des scientifiques néerlandais. CASCEFF identifie donc les secteurs du transport (routier, ferré, aérien, maritime), de l'énergie (électricité, hydrocarbures et gaz, réseaux de chaleur), des communications (télécommunications, média), le commerce et l'industrie, l'eau (potable et usée), les instances gouvernementales, l'approvisionnement alimentaire (agriculture et distribution), la santé, les services d'urgence, les banques et la finance, l'éducation, l'environnement, le public.  |
| Architecture      | CASCEFF est à la fois un modèle formalisé de description des défaillances en cascade et un outil de modélisation de celles-ci. Deux pistes de modélisation physique ont été suivies pour étudier les effets en cascade : les modèles simplifiés et l'utilisation de la dynamique des fluides numérique.   |

|               |   |
|---------------|---|
|               | <p>CASCEFF s'intéresse à la description des impacts sur les systèmes touchés, selon les dimensions techniques, organisationnelles, sociales, humaines, économiques et environnementales.</p> <p>Classification selon :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- « Initiating event »</li> <li>- « Originating System »</li> <li>- « Dependency »</li> <li>- « Dependent System », <ul style="list-style-type: none"> <li>- "Dependency Impact" avec échelle de niveau allant de 0 à 1. (Effets sur le système impacté engendrés par ses dépendances à d'autres systèmes impactés étant donné certaines conditions de dépendances mais en excluant les capacités de réactions inhérentes des systèmes impactés =&gt; défaillances du système de transport qui entraîne un absentéisme de 25% du personnel médical)</li> <li>- "System Impact" avec échelle de niveau allant de 0 à 1. (Effets résultants sur le système impacté engendrés par un ou plusieurs « Dependency Impacts » et étant donnée ses capacités de réactions inhérentes et les conditions du système =&gt; les chirurgies majeures ne peuvent pas être réalisées à cause d'un manque de 25% du personnel médical et de l'impossibilité d'appeler des remplaçants)</li> <li>- "Consequence"</li> <li>- "Conditions"</li> <li>- "Characteristics »</li> </ul> </li> </ul> |
| Interface     | <p>Outil numérique de caractérisation de l'évolution des incidents, aide à la gestion des accidents en cascade et de leurs impacts humains et technologiques. L'objectif est de pouvoir décrire de façon systématique des caractéristiques clés des effets en cascade des événements passés pour analyser les effets en cascade.</p> <p>Identification des éléments déclencheurs, des dépendances et des points clés de décision :</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 : Identifier les systèmes impactés.</li> <li>2 : Décrire les « Dependency Impacts ».</li> <li>3 : Décrire les « System Impacts ».</li> </ol>  |
| Mise en œuvre | <p>Les outils pourront être utilisés en temps réel, mais aussi pour planifier et s'entraîner en amont. Validation de l'outil réalisée grâce à sa mise en œuvre dans différents processus de gestion d'incidents et de plateformes de différents utilisateurs finaux du projet (NoKeos, iCrisis, RIB, WIS and XVR). Des cas d'étude pilotes ont été menés par ailleurs.</p>  |
| Données       | <p>Le modèle prend en compte les aspects physiques mais aussi humains, et donc les données correspondantes. Les données collectées comprennent des données empiriques existantes, rassemblées à partir de documents existants tels que des rapports officiels, des enquêtes ou des reportages dans les médias. Les données d'entrées sont les propriétés physiques des infrastructures critiques, les risques, les comportements humains, les décisions prises et leur chronologie.</p>   |



(Cedergren & Johansson, 2017; Consortium Casceff, 2018; Edjossan-Sossou, 2019; Ekman & Lange, 2014; Hassel et al., 2015; Lange et al., 2015; Lönnermark et al., 2016; Lönnermark & Lange, 2016)

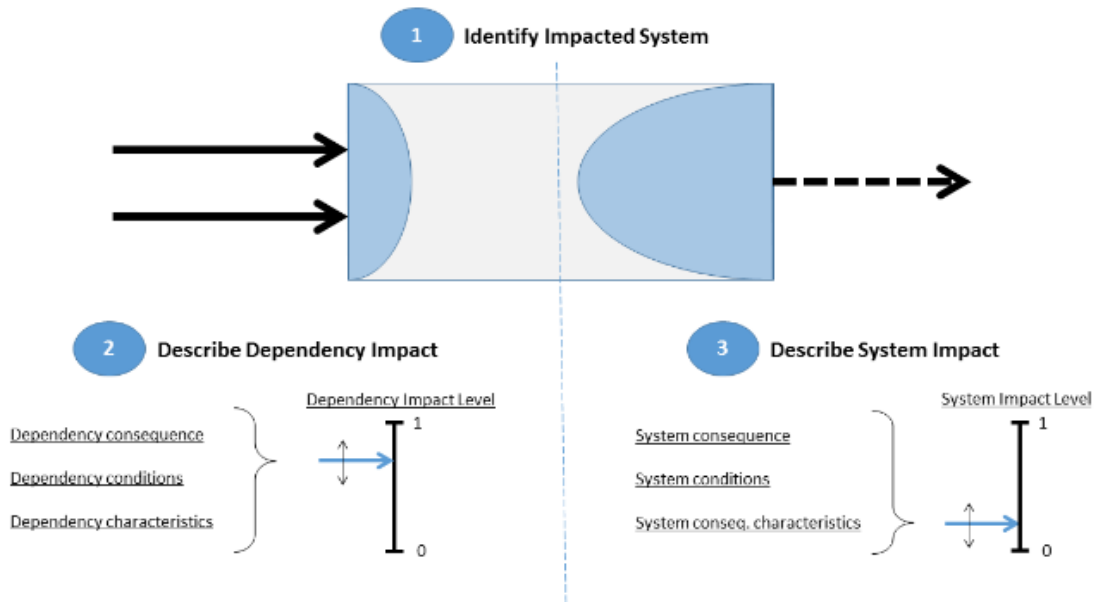


Figure 159 : Formalisation des liens de dépendances et de leurs conséquences sur les systèmes. Source : (Hassel et al., 2015).

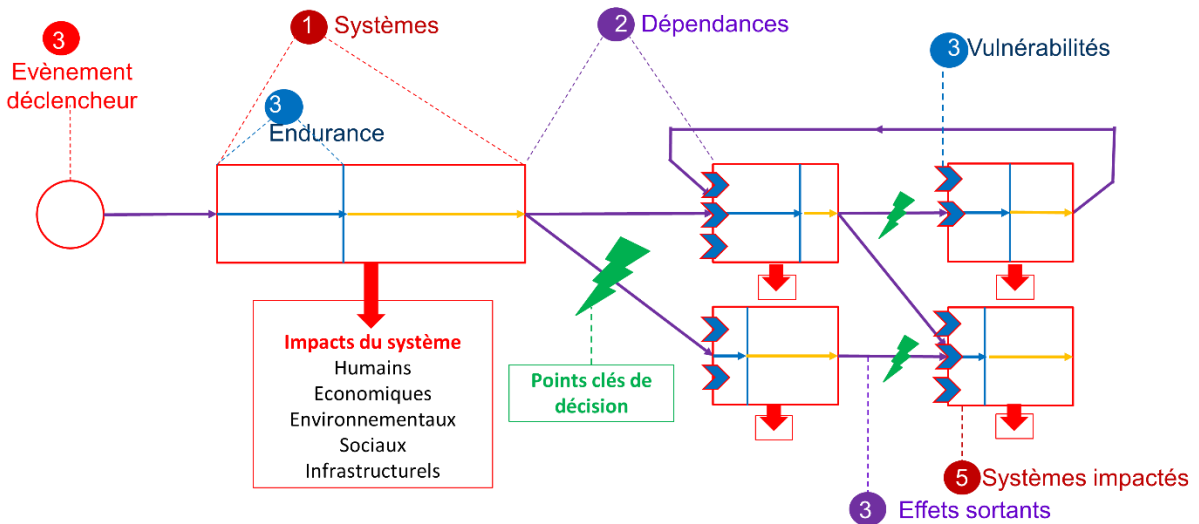


Figure 160 : Représentation de la formalisation utilisée dans Casceff. Source : (Consortium Casceff, 2018).

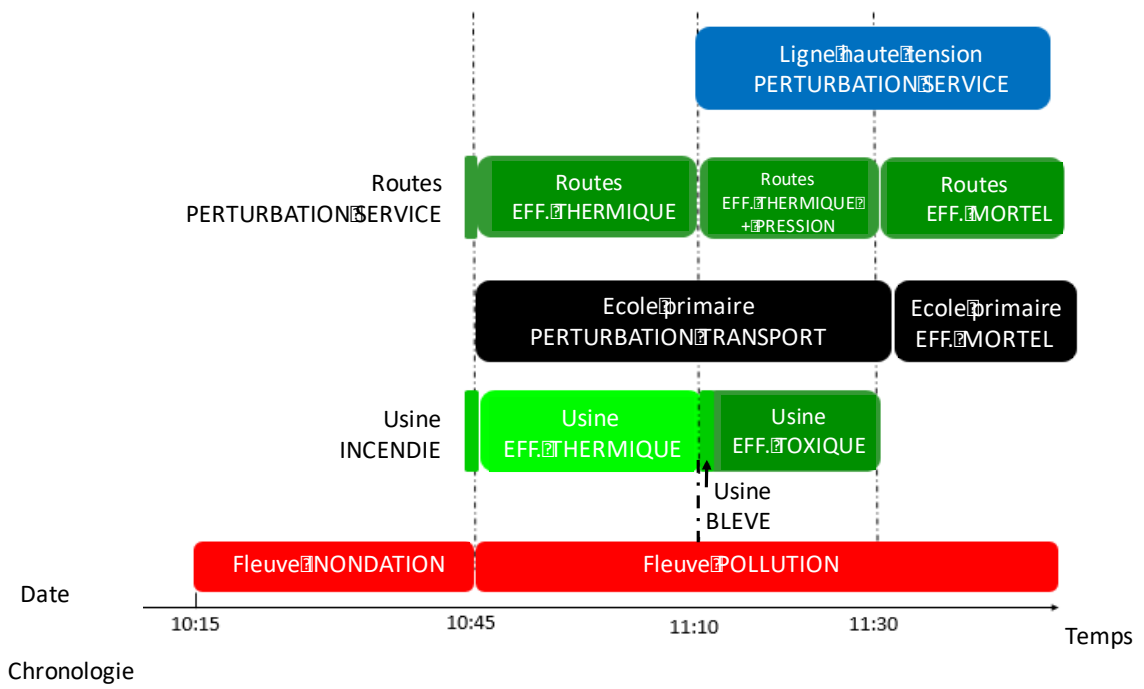


Figure 161 : Représentation graphique des résultats, reprenant l'évolution des perturbations selon le temps. Source : (Edjossan-Sossou, 2019).

## 1.2. CIPMA

Tableau 63 : Présentation du programme CIPMA

| CARACTERISTIQUE   | DESCRIPTION   |
|-------------------|---|
| Cadre et porteurs | <p>CIPMA est un programme gouvernemental australien signifiant “Critical Infrastructure Program for Modeling and Analysis”, porté par le département en charge de la sécurité nationale (Attorney-General’s Department - National Critical Infrastructure). Cette approche s’appuie sur un réseau d’acteurs nommé TISN (Trusted Information Sharing Network) qui regroupe les propriétaires et exploitants d’infrastructures critiques et les cellules gouvernementales concernées pour échanger de l’information de façon sécurisée et organisée.</p> <p>Geoscience Australia et CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) sont également partenaires techniques et scientifiques.</p>  |
| Objectifs         | <p>Les principaux objectifs du programme sont d’améliorer la compréhension des interdépendances et des vulnérabilités des réseaux d’infrastructures critiques et les impacts physiques, sociaux et économiques potentiels des défaillances de ces infrastructures.</p> <p>CIPMA se veut un outil de prévention et d’assistance aux gestionnaires et aux décideurs, par l’aide à l’identification et à l’évaluation des risques et des interdépendances concernant les infrastructures critiques, l’assistance à l’identification des investissements à prioriser et à l’évaluation des stratégies de mitigation mais aussi l’aide à l’identification de points critiques et d’effets en cascade...</p>  |
| Aléas             | <p>CIPMA se concentre principalement sur les aléas naturels extrêmes, le terrorisme domestique et les cyber activités malveillantes.</p>  |
| Objets            | <p>Les objets ici considérés et modélisés sont les infrastructures critiques. Celles-ci sont définies dans ce contexte comme des installations physiques, des chaînes d’approvisionnement, des technologies de l’information et des réseaux de communication qui, s’ils sont détruits, dégradés ou indisponibles pendant une période prolongée, auraient une incidence importante sur le bien-être social ou économique de la nation ou affecteraient la capacité de l’Australie assurer la sécurité et la défense nationale.</p> <p>Les infrastructures critiques devraient s’étendre à plusieurs secteurs, notamment les banques et la finance, les communications, l’énergie, l’approvisionnement en nourriture et les commerces, la santé, les transports et l’eau. Les acteurs concernés rejoignent progressivement cette initiative depuis une dizaine d’années. Pour l’instant, l’accent a été mis sur les secteurs bancaire et financier, les communications, l’énergie, l’eau et les transports.</p> |

|               |  |
|---------------|--|
| Architecture  | <p>La démarche passe par différentes étapes de modélisation, simulation, cartographie et analyse de perturbations d'origine naturelle ou humaine. Une assistance aux propriétaires et aux exploitants d'infrastructures critiques est ensuite proposée pour renforcer la résilience.</p> <p>Approche top-down très complexe, élaborée par de nombreux chercheurs et opérationnels depuis de nombreuses années.</p> <p>Outil logiciel qui combine :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Des modèles de simulation (continue)</li> <li>• Des modèles d'interdépendances géo référencés basés sur des réseaux de Pétri colorés (avec CP Tools)</li> <li>• Des bases de données</li> <li>• Des SIG (au centre de l'outil, pour la collecte des données, la modélisation et la visualisation des résultats)</li> <li>• Des systèmes multi-agents</li> <li>• Des modèles économiques (tout est transformé en dommages économiques, pour évaluer les meilleurs investissements à faire)</li> </ul> <p>Il couple aussi des modèles de tremblement de terre, inondation de tsunami, explosion de bombe.</p> <p>C'est une suite de modèles et d'outils et non une boîte noire, qui prend apparemment en compte les interdépendances « primaires ».</p> <p>La méthodologie se concentre sur :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Les conséquences des défaillances des infrastructures critiques (économie, population) avec une visualisation SIG</li> <li>• Les nœuds de défaillance, particulièrement vulnérables et qui pourraient entraîner d'importants effets en cascade (toujours en termes de coûts)</li> <li>• Les risques, à travers la construction de cartes de risques</li> <li>• Les stratégies d'investissement et de mitigation</li> </ul> <p>L'outil permet de calculer les effets en cascade d'une défaillance à l'intérieur d'un secteur d'activité, puis l'impact de celui-ci sur les opérations d'un autre secteur d'activité.</p> |
| Interface     | <p>Solution disponible directement pour les utilisateurs finaux, proposés aux gouvernements, aux décideurs et aux opérateurs australiens. Logiciels requis pour l'interface : ArcGIS, ArcSDE, Oracle, Vensim DSS, Dynamic Network System (DNS), CLIPS, Java Runtime Environment (JRE).</p> <p>L'outil final permet théoriquement l'identification des points particulièrement vulnérables, qui peuvent déclencher d'importants effets en cascade, ainsi que l'élaboration de carte de risques et de stratégies d'investissement et de mitigation.</p>  |
| Mise en œuvre | <p>Utilisé pour l'étude des ouragans depuis 2004 (phase de test entre 2004 et 2008). Soutien au « Australian Crisis Coordination Centre ». Utilisations potentielles : support d'exercices, analyse des (inter)dépendances entre eau et électricité, analyse d'impacts en cascade pour une série d'incidents...</p>  |

|         |  |
|---------|--|
|         | <p>CIPMA développe et utilise les outils de modélisation et de simulation avec des données réelles pour fournir une analyse objective des perturbations potentielles d'origine naturelle ou humaine des infrastructures critiques. Les propriétaires et les opérateurs d'infrastructures critiques en partenariat avec CIPMA peuvent utiliser ces informations pour mieux se préparer, prévenir, réagir ou récupérer des perturbations.</p> <p>CIPMA aide les décideurs gouvernementaux et commerciaux à adopter une approche stratégique pour renforcer la résilience des infrastructures critiques à travers plusieurs axes d'action et de réflexion : fournir des informations sur le comportement de réseaux d'infrastructure complexes, analyser les relations et les dépendances d'infrastructure critiques, identifier les points de restriction, les points de défaillance uniques et d'autres vulnérabilités, examiner les répercussions d'une défaillance de l'infrastructure et tester les stratégies d'atténuation et les plans de continuité des activités.</p> <p>En plus de son travail principal, le CIPMA aide à améliorer les interventions de gestion des urgences et soutient le Centre Australien de Coordination des Crises. Les travaux de la CIPMA contribuent également à brosser un tableau des infrastructures critiques d'importance nationale et aident les gouvernements australiens à élaborer leurs politiques en matière de résilience des infrastructures critiques.</p> <p>NB : Contexte particulier de l'Australie en termes d'infrastructures critiques (île étendue et isolée, peu de redondances...).</p> |
| Données | <p>CIPMA gère de façon sécurisée et protège les données et les informations sensibles reçues des parties prenantes. Cette protection est renforcée par des installations et un hébergement sécurisé et un système informatique spécifique.</p> <p>CIPMA utilise une vaste gamme de données et d'informations pour modéliser et simuler le comportement des systèmes d'infrastructures critiques et la façon dont ils interagissent.</p> <p>Collaboration très étroite avec les opérateurs et gestionnaires : intégré dans la stratégie lancée par le Trusted Information Sharing Network (TISN), un réseau créé en 2003 pour offrir un environnement sécurisé pour le partage d'informations sensibles et la construction de stratégies de résilience parmi les infrastructures critiques.</p>   |
| Sources | <p>(Lew, 2011; NSW Government, 2018; Pederson et al., 2006; Scott, 2007; Stergiopoulos et al., 2016)</p>   |

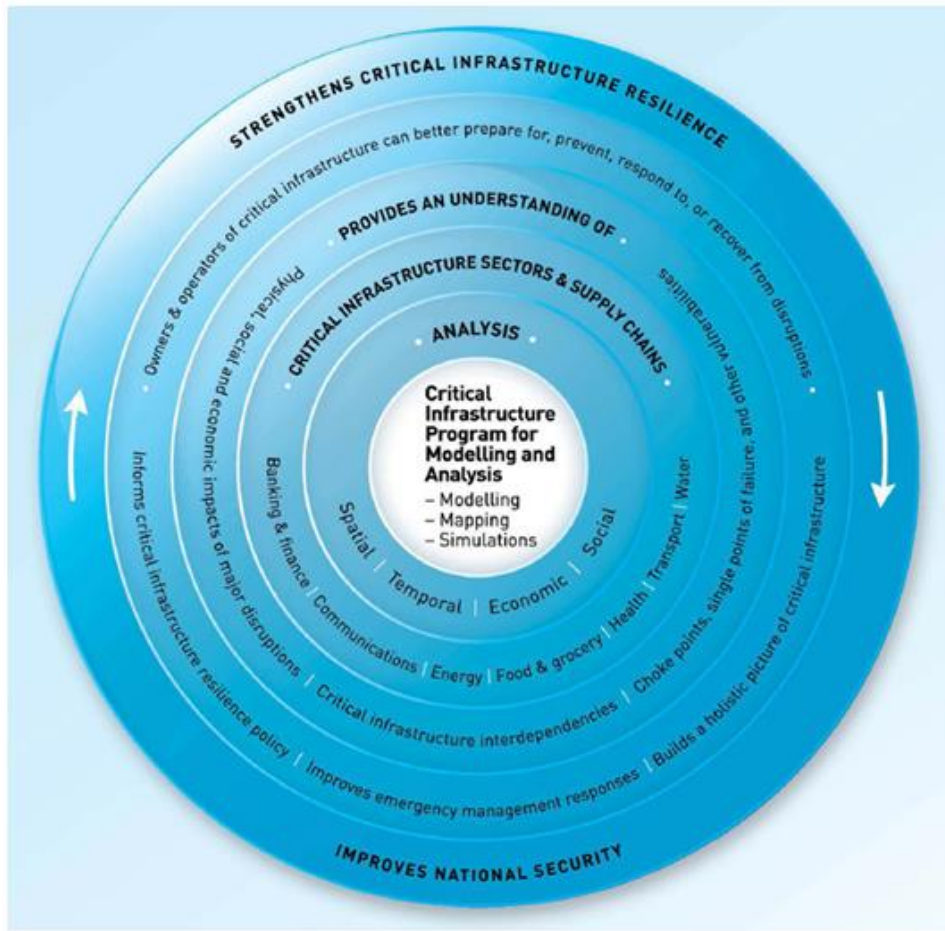


Figure 162 : Représentation graphique et schématique de l'approche CIPMA et de ses objectifs. Source : (Scott, 2007)

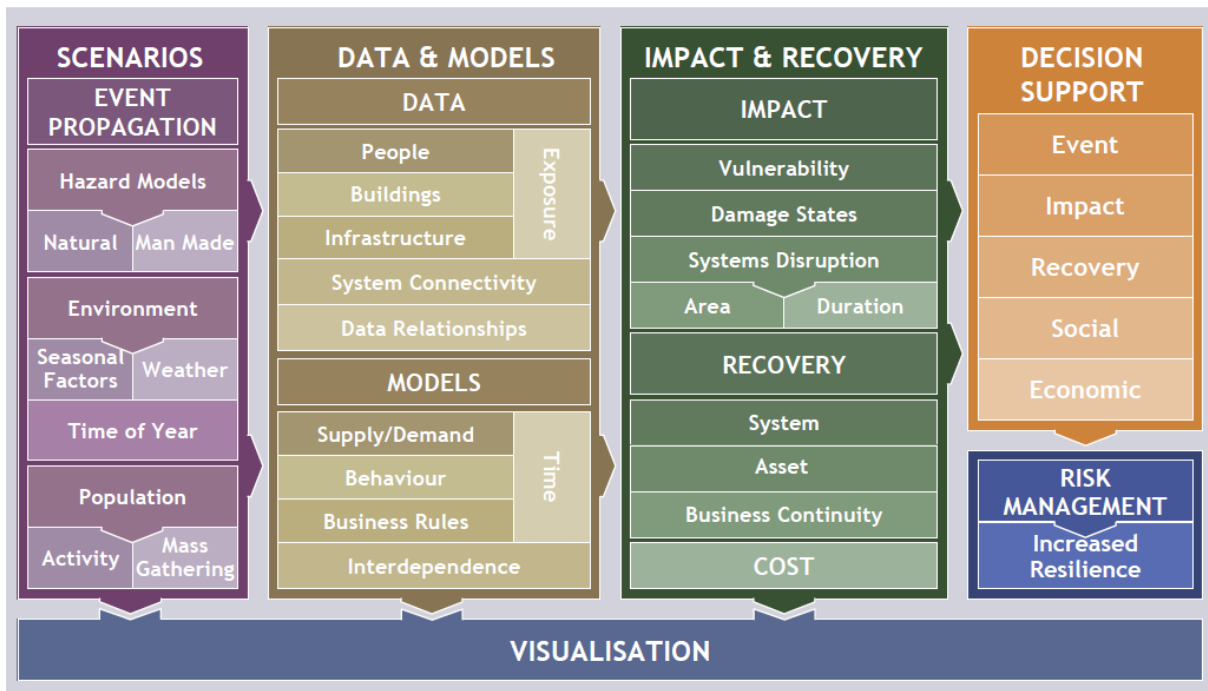


Figure 163 : Architecture de l'approche CIPMA. Source : (Scott, 2007)

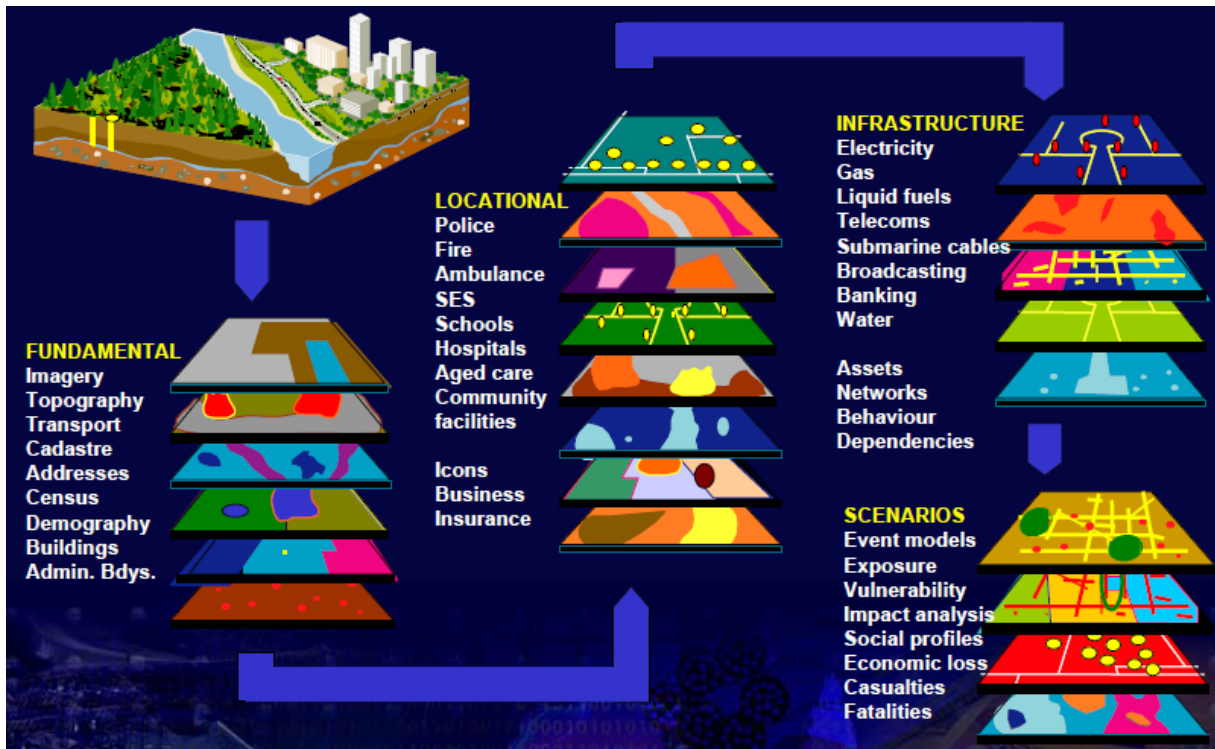


Figure 164 : Vue d'ensemble des entrées et sorties du modèle de CIPMA. Source : (Scott,2007)

### 1.3. CISIA / CISIAPro

Tableau 64 : Présentation de l'approche CISIA

| CARACTERISTIQUE   | DESCRIPTION  |
|-------------------|--|
| Cadre et porteurs | L'approche CISIA signifie « Critical Infrastructure Simulation by Interdependent Agents », et a été développée au sein de différents projets de recherche successifs depuis le milieu des années 2000. CISIA est porté par l'Université Roma Tre en Italie, qui a continué à y travailler par la suite. L'outil a été révisé et complété en 2014 et 2015 et est désormais proposé sous le nom de CISIAPro.   |
| Objectifs         | CISIA est une approche dédiée à l'analyse d'infrastructures hétérogènes et interdépendantes, orientée de manière à identifier les phénomènes les plus critiques liés à la propagation des défaillances et à la dégradation des performances. Elle doit permettre l'évaluation des impacts à court-terme des défaillances, faciliter les « what-if scenario analysis » et isoler les éléments critiques.  |
| Aléas             | Tous les types d'aléas peuvent théoriquement être considérés.  |
| Objets            | Les réseaux potentiellement considérés par CISIA sont l'électricité, l'eau, le gaz, les télécommunications, le transport ferré, le réseau routier et les aéroports.  |
| Architecture      | <p>Cette approche est mixte, et présente les caractéristiques de deux visions de modélisation : l'analyse des interdépendances et l'analyse des systèmes, correspondant à une approche holistique et une approche réductionniste.</p> <p>Ce « Complex Adaptive System (CAS) » utilise un système multi-agents qui s'appuie sur des bases de données relationnelles, et s'inspire de la modélisation MHR (« Mixed Holistic-Reductionistic ») avec des niveaux de granularité flexibles. On observe donc trois niveaux d'abstraction : les entités holistiques (l'infrastructure comme un tout), les entités de service (élément logique qui fournit ou agrège une ressource) et les entités réductionnistes (tout composant physique d'une infrastructure). Le modèle est obtenu en considérant une population de systèmes non-linéaires mutuellement dépendants, qui représentent chacun un macro-élément d'une infrastructure donnée. Chaque agent possède une structure organisée unifiée, au sein d'une famille d'infrastructure prédéfinies.</p> <p>Les agents sont reliés entre eux avec des matrices à plusieurs niveaux, entre chaque infrastructure mais aussi entre les composants d'une même infrastructure. Les entités échangent des ressources et des défaillances, elles peuvent consommer ces ressources ou en produire (si disponibilité des ressources, absence de défaillance et intégrité de l'agent). Ces relations sont formalisées sous la forme de « Requirement Incidence Matrix » (mR) et de « Fault Incidence Matrices » (FIMs).</p> |



|               |   |
|---------------|---|
|               | <p>Les interdépendances prises en compte ont été étendues et aujourd’hui les différentes couches d’un agent correspondent aux différents types d’interdépendances pris en compte (voir Figure X ci-dessous).</p> <p>Chaque réseau est simulé séparément, selon son fonctionnement particulier, puis les infos sont reportées au niveau supérieur. Des pas de temps appelés « tick time » sont donc utilisés pour obtenir une simulation discrète.</p>   |
| Interface     | <p>L’outil est destiné aux gestionnaires et propriétaires d’infrastructures, ainsi qu’aux gestionnaires de crise. Le simulateur s’appuie sur le « Recursive Porus Agent Simulation Toolkit » REPAST, qui est un logiciel libre open-source de simulation multi-agents. L’outil est aujourd’hui disponible sous format web, et a été entièrement refondé. Il est doté d’un système de contrôle et d’acquisition de données (SCADA).</p> <p>Il est théoriquement possible de combiner CISIA avec d’autres modèles SMA et de connecter leurs agents.</p>   |
| Mise en œuvre | <p>L’outil est complètement opérationnel, et utilisé dans différents contextes et pour différents objectifs. Il a notamment permis de modéliser certains réseaux d’un campus universitaire (non spécifié pour raisons de sécurité). CISIA a également été utilisé pour l’implémentation du banc d’essai du projet de recherche MICIE. Le modèle a été appliqué sur la ville de Rome pour un scénario de tempête solaire, et est également appliqué sur la région de Calabre.</p> <p>Le modèle a été utilisé au sein des projets de recherche tels que FACIES et URANIUM, il est également intégré dans le projet H2020 ATENA.</p> |
| Données       | <p>L’outil est basé sur un protocole de simulation, pour lequel les données sont réduites au minimum pour faciliter la collecte des informations techniques et spécifiques, souvent sensibles. Les incertitudes sont traduites par l’utilisation de nombres flous. Les résultats de la simulation sont communiqués sous la forme de variations de capacité de fonctionnement d’une infrastructure en fonction du temps.</p>   |
| Sources       | <p>(Foglietta et al., 2015; Grangeat, 2017; Palazzo, 2015; Stefano Panzieri et al., 2005)</p>   |

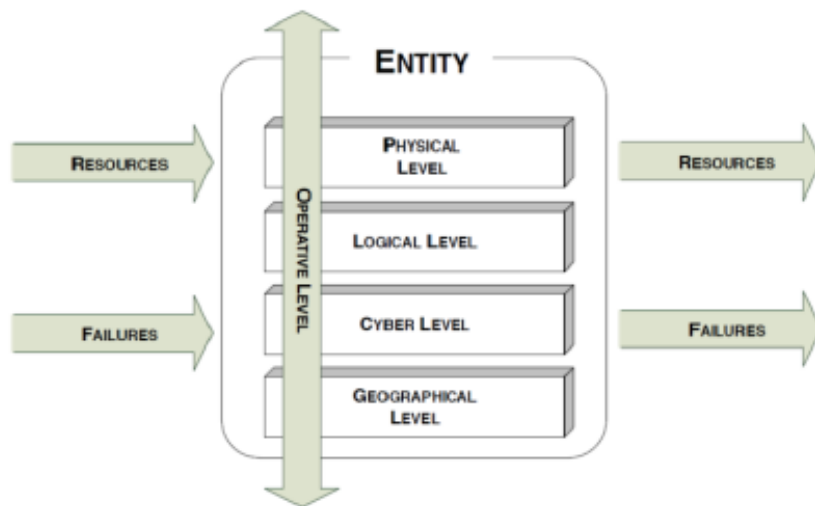


Figure 165 : Structure d'un agent et des différentes couches au sein du modèle CISIA. Source : (Foglietta et al., 2015).

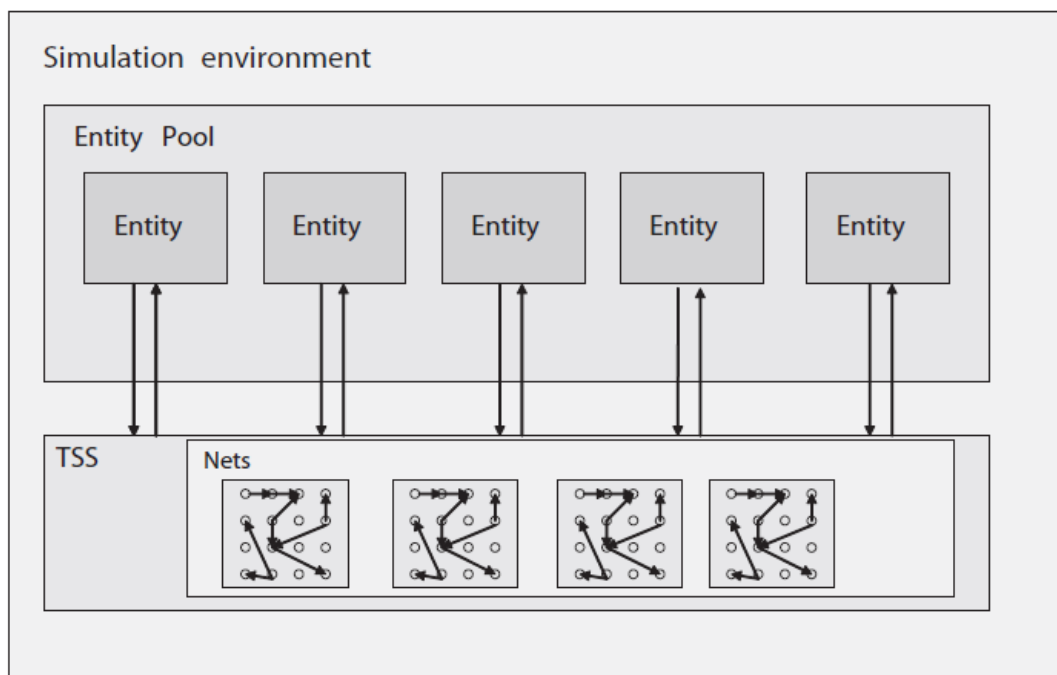


Figure 166 : Schématisation de la structure du simulateur : la partie "Entity Pool" pour la gestion de l'évolution des entités et la partie « Transmission Sub System » pour la gestion des communications entre ces dernières. Source : (Stefano Panzieri et al., 2005).

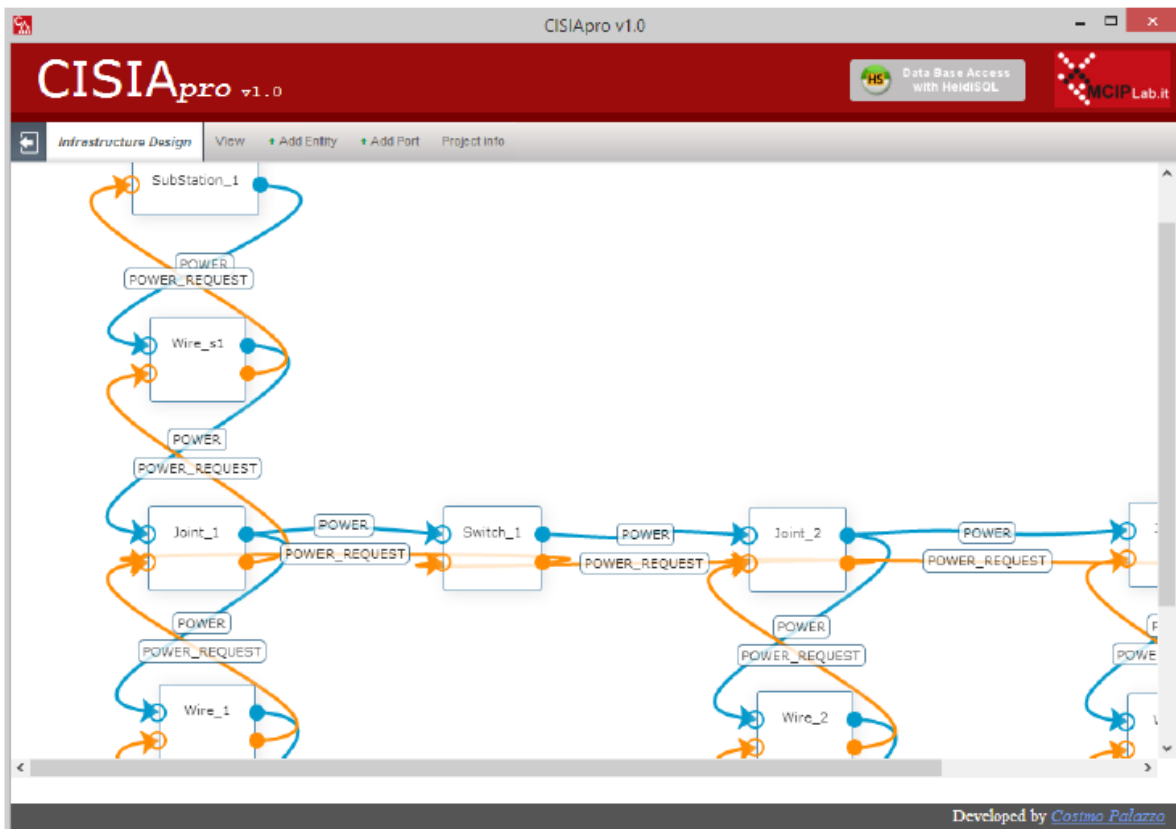


Figure 167 : Exemple de représentation d'un système sous CISIAPro. Source : (Palazzo, 2015).

## 1.4. Domino

Tableau 65 : Présentation de l'approche DOMINO.

| CARACTERISTIQUE   | DESCRIPTION  |
|-------------------|--|
| Cadre et porteurs | <p>Cette approche a été développée depuis 2008 dans le cadre de différents projets de recherche, notamment le projet « Évaluation et modélisation des interdépendances et des effets dominos entre réseaux de support à la vie : Montréal et Québec ».</p> <p>Ces projets sont portés par le Centre Risque et Performance de l'École Polytechnique de Montréal, qui collabore avec des gestionnaires de réseaux, des ministères et les collectivités concernées.</p>   |
| Objectifs         | <p>Les objectifs affichés par cette approche sont d'identifier et d'anticiper les « effets dominos », de prioriser les mesures de prévention et de protection, et de mettre en place des mécanismes d'alerte et de communication en situation d'urgence. L'outil vise à évaluer les propagations dans le temps des conséquences sur les réseaux d'une situation pouvant engendrer un effet domino sans, a priori, s'attarder aux causes ayant mené à cette situation.</p> <p>Les objectifs méthodologiques sont (à vérifier) :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• L'identification des liens d'(inter)dépendances</li> <li>• La formalisation de ces liens</li> <li>• La modélisation des relations</li> <li>• La simulation de scénarios</li> </ul> |
| Aléas             | <p>Tous les types d'aléas peuvent théoriquement être pris en compte. En effet, cette approche s'appuie sur une gestion des risques basée sur les conséquences, ce qui a permis d'élaborer une démarche fondée sur l'analyse des conséquences et non sur des causes particulières. L'avantage de cette approche est que la démarche développée peut être adaptée à tous types d'événements.</p>   |
| Objets            | <p>Cette approche étudie les « Réseaux de support à la vie », c'est-à-dire les réseaux d'eau, d'électricité (et pétrole ?), l'assainissement, les télécommunications, les transports en commun, ainsi que les « infrastructures essentielles ».</p>  |
| Architecture      | <p>Nous avons catégorisé Domino comme une approche « ascendante » pour plusieurs raisons : elle se rapproche plus d'un système expert que d'une réelle modélisation des (inter)dépendances et défaillances au sein des infrastructures ; les conséquences sont exprimées sous forme de zones spatiales ; elle fonctionne sur la base de questionnaires renseignés par les parties prenantes ; elle permet la collaboration entre parties prenantes.</p>  |

Domino fonctionne à partir de 4 postulats de départ :

- Une IE a pour mission de fournir une ressource (RF)
- Pour fonctionner, une IE utilise une ou plusieurs RF par une ou plusieurs autres IE (RU)
- La défaillance d'une IE entraîne une dégradation de la FR, ce qui peut affecter d'autres IE
- On parle d'aléa lorsqu'une IE utilise une ressource dégradée.

L'outil est basé sur une BDD relationnelle « Relational Data Based Model », liée à un SIG assez robuste, en lien avec des modèles de dépendances entre infrastructures (on se place directement au niveau des infrastructures sans passer par les services).

Les interdépendances prises en compte sont principalement fonctionnelles, cybernétiques et géographiques. Le fonctionnement des réseaux n'est pas explicite. De plus, les zones impactées ou non sont apparemment statiques et indépendantes du contexte.

Cet outil de planification et d'aide à la décision est hébergé au sein d'une plateforme web sécurisée, destiné aux gestionnaires des réseaux et aux responsables de la sécurité civile. Différents modules permettent des utilisations diverses selon les acteurs. Selon les activités, les besoins et les utilisateurs, la mise en commun et la précision des données est adaptée après une analyse des besoins en informations de chaque utilisateur.

Des indicateurs de fonctionnement des infrastructures sont définis selon différentes couleurs :

- Vert : le réseau fonctionne normalement (avec ou sans les ressources courantes)
- Jaune : le réseau utilise au moins une ressource dégradée mais les moyens alternatifs sont suffisants, le service est maintenu à long terme
- Orange : le réseau utilise au moins une ressource dégradée et les moyens alternatifs ne sont pas suffisants, le service est compromis à court terme.
- Rouge : la mission du réseau est affectée sur un ou plusieurs secteurs de la zone d'étude, la ressource n'y est plus fournie.

Les résultats peuvent être présentés notamment sous trois formes :

- Courbes de conséquences qui présentent les conséquences d'une défaillance sur une infrastructure en fonction de l'état de la ressource utilisée. Prise en compte des effets dominos.
- Courbes de dépendances qui permettent de connaître les différents seuils d'utilisation d'une ressource en fonction d'une unité de mesure définie.
- Courbes des besoins en ressources alternatives.

Un nouveau projet a été lancé par le CRP, la Direction de la sécurité civile de la Ville de Montréal et le Ministère de la Sécurité Publique, pour l'intégration de l'outil DOMINO à la nouvelle solution d'Infrastructure Géomatique Ouverte (IGO, logiciel gratuit produit par l'administration publique québécoise). Domino deviendrait une application web qui se grefferait à la plateforme en tant que module externe.

## Mise en œuvre

Domino est un outil opérationnel, et toujours en amélioration actuellement. La ville de Montréal utilise notamment cet outil dans la planification des mesures de protection entre les réseaux de la ville, pour des exercices en sécurité civile et afin d'établir des cartographies de risques pour des aléas naturels. L'outil a été utilisé à plusieurs reprises lors d'événements assez localisés comme des ruptures de canalisations.

La première étape de l'implémentation permet alors la création d'un espace de coopération, favorisant la collaboration, le partage d'informations et de connaissances entre les gestionnaires d'infrastructures essentielles. La deuxième étape consiste en la caractérisation de la zone d'étude, avec le découpage en secteurs pour appliquer le principe de cartographie souple, et l'identification des zones d'alimentation en ressources. A chaque infrastructure est associée une zone de service (statique) qui ne serait plus fournie en cas de défaillance de l'infrastructure. Le fonctionnement de l'infrastructure n'est donc pas spécifié. La dernière étape permet finalement la caractérisation des infrastructures essentielles, en deux temps, : tout d'abord une caractérisation globale pour le réseau dans son ensemble, puis une caractérisation spécifique pour la zone d'étude.

## Données

Les opérateurs remplissent et mettent à jour des questionnaires sur l'autonomie de leur structure en cas de perturbation de ses ressources et leurs solutions alternatives pour continuer à fonctionner en mode dégradé. Les données renseignées sont donc les résultats d'analyses de vulnérabilité et non des données brutes, qui ne sont jamais échangées en tant que telles. Par ailleurs, l'outil recueille toutes les analyses des acteurs mais ne partage que les résultats des simulations.

Domino utilise les principes de la cartographie floue mais dynamique pour gérer la confidentialité, qui intègre des informations cartographiques non précises (comme une densité d'infrastructures) avec des informations techniques pertinentes regroupées sous forme matricielles ou graphiques. Le territoire est maillé de façon assez grossière, pour permettre la localisation floue de chaque infrastructure.

## Sources

(Awekidian, 2013; Lemesre, 2013; Pellet, 2009; Benoit Robert, 2004; Benoit Robert et al., 2012, 2013)

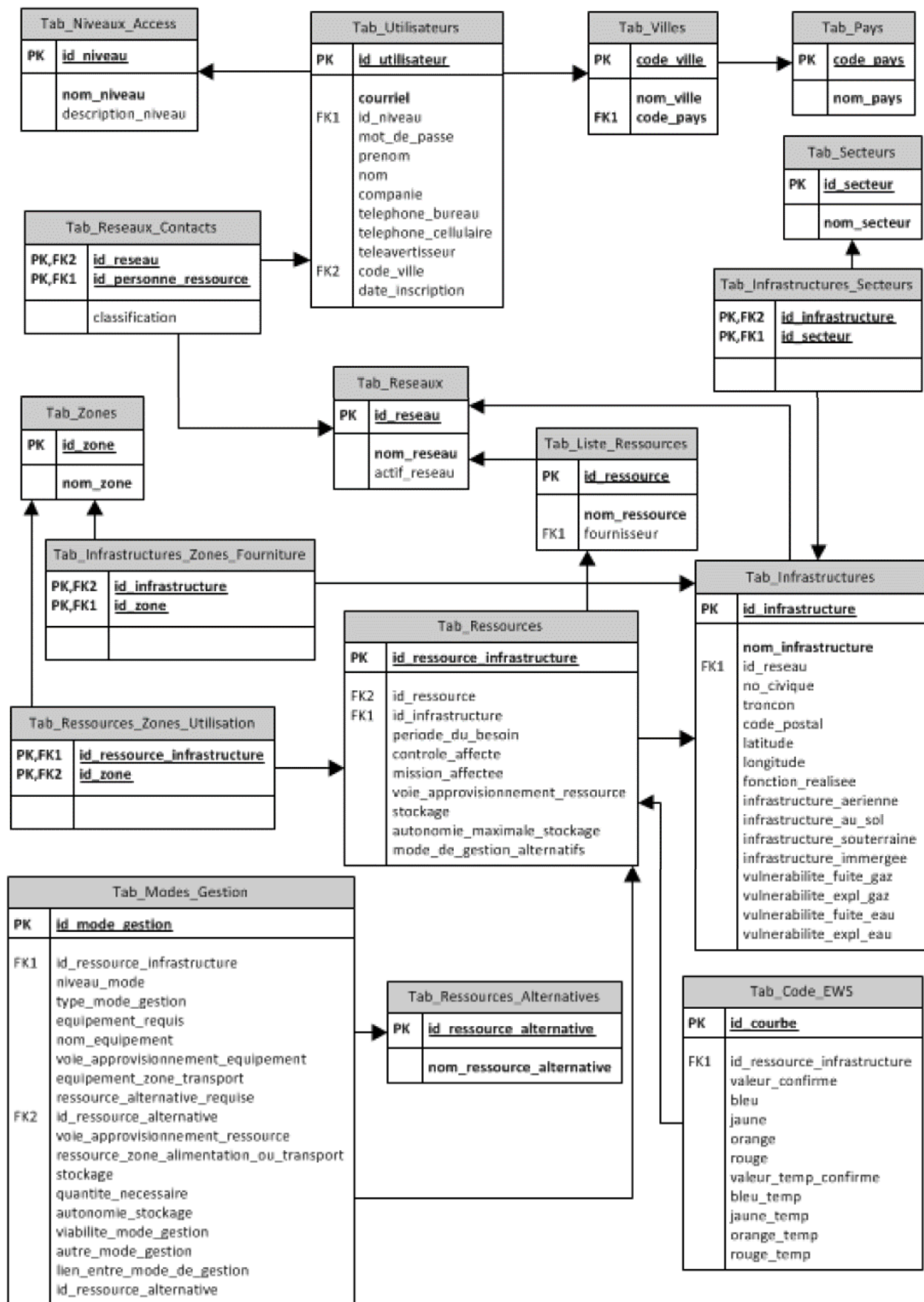


Figure 168: Architecture de la base de données supportant Domino. Source : (Pellet, 2009).

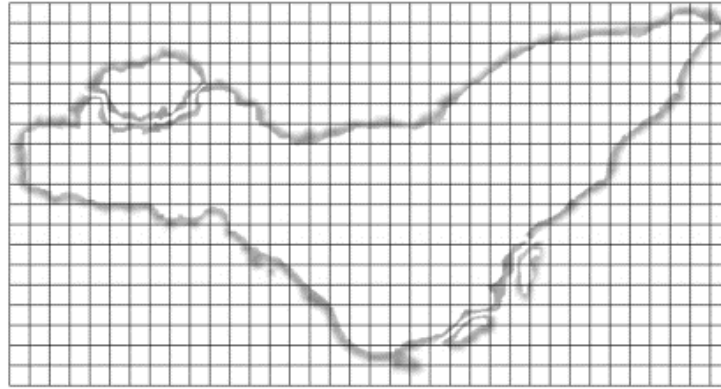


Figure 169 : Exemple de découpage d'une zone d'étude en secteurs. Source : (Robert et al, 2013).

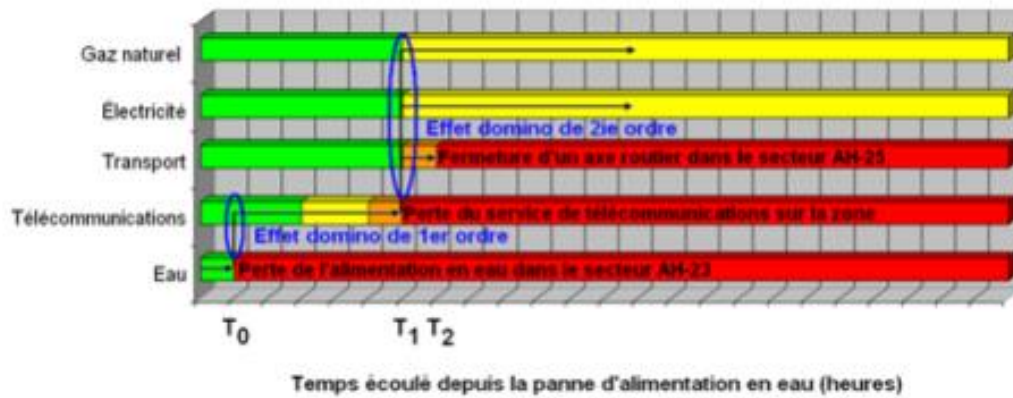


Figure 170 : Représentation graphique d'un effet domino entre différents réseaux après une coupure d'alimentation en eau. Source : (Robert & Morabito, 2008).

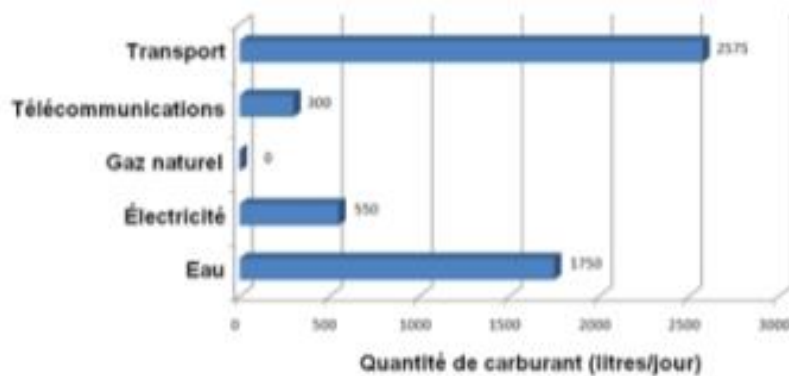


Figure 171: Représentation des besoins en carburant pour les générateurs de secours. Source : (Robert & Morabito, 2008).



## 1.5. Hazur

Tableau 66 : Présentation de l'outil HAZUR.

| CARACTERISTIQUE   | DESCRIPTION  |
|-------------------|--|
| Cadre et porteurs | Démarche et outil développés par la start-up espagnole Opticits, à la suite de collaborations avec le monde de la recherche. Cet outil n'a pas été élaboré dans le cadre d'un projet de recherche, mais sa version actualisée Hazur 2.0. a été développée dans le cadre d'un projet de recherche nommé RESCCUE, qui sera détaillé dans la catégorie des approches fédératrices.  |
| Objectifs         | <p>Cette démarche a pour principal objectif la collaboration des acteurs et parties prenantes concernés par la problématique de la résilience des réseaux urbains. Au sein de ce projet holistique, elle vise plus particulièrement à :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• L'identification des liens d'(inter)dépendances</li> <li>• La formalisation de ces liens</li> <li>• La modélisation des relations</li> <li>• La représentation des scénarios induits (absence de réelle simulation)</li> </ul> <p>L'aide à la décision n'est pas encore aboutie mais fait partie des axes de construction d'Hazur 2.0. dans le cadre du projet RESCCUE.</p> |
| Aléas             | Tous les types d'aléas peuvent théoriquement être pris en compte. En effet, cette approche s'appuie sur une gestion holistique du système urbain et peut être adaptée à tous types d'événements, même ceux considérés comme des stress plutôt que des aléas (événement ponctuel comme un marathon par exemple).  |
| Objets            | <p>Les objets considérés sont les services urbains au sens large et leurs infrastructures :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Energie</li> <li>• Télécommunications</li> <li>• Eau</li> <li>• Assainissement</li> <li>• Déchets</li> <li>• Transports</li> <li>• Sécurité civile</li> <li>• Santé</li> <li>• Education</li> </ul> <p>Il est théoriquement possible de rajouter des services et des infrastructures non paramétrés.</p>  |
| Architecture      | L'outil est basé sur la mise en relation de matrices de cotation et sur un algorithme calculant les enchaînements de défaillances selon l'événement perturbateur et les autonomies cumulées, ainsi que la propagation géographique des impacts.  |

|               |   |
|---------------|---|
| Interface     | <p>Hazur propose une interface web accessible par un navigateur internet standard. La plateforme permet de renseigner, centraliser, analyser et représenter toutes les données concernant les dépendances et les impacts sur les services urbains. La plateforme est accessible pour les clients ayant acheté une licence, à qui est également proposée une aide en continu.</p> <p>Les résultats sont visualisables sous forme de matrices, de graphes relationnels ou de cartes interactives (voir illustrations plus bas). Les incertitudes, qu'elles portent sur le fonctionnement intrinsèque des infrastructures ou sur les interdépendances, et les imprécisions ne sont pas réellement étudiées.</p> <p>Les réseaux et services sont toujours étudiés en tant que groupement d'infrastructures ponctuelles en relation, et non en tant que réseaux formés de nœuds et de linéaires</p>  |
| Mise en œuvre | <p>L'outil est opérationnel et a été testé et utilisé dans différentes villes d'Europe : Lisbonne, Bristol, Barcelone, Orléans, La Terrassa...</p> <p>La première étape est l'identification des « joueurs », organismes ou individus qui ont un rôle dans la planification et la gestion de crise, et les « parties prenantes » qui ont un rôle dans la gestion des différents services urbains nécessaires au fonctionnement de la ville. La méthode nécessite ensuite de renseigner (acteurs, caractéristiques et localisation) les services urbains à étudier, et les infrastructures principales à considérer. Les acteurs doivent remplir, au fur et à mesure d'entretiens et d'ateliers collaboratifs, des matrices de dépendances, en indiquant les autonomies et les criticités pour chaque dépendance.</p> <p>Hazur permet ensuite de modéliser de façon schématique mais aussi de localiser sur un SIG les liens et interdépendances identifiés.</p> |
| Données       | <p>Les données renseignées sont relatives aux infrastructures, aux liens de dépendances, aux temps d'autonomie, aux criticités des services, aux redondances et aux solutions palliatives. Des matrices relationnelles sont remplies par les acteurs. Chaque acteur doit renseigner les données le concernant, et celles-ci sont partagées avec le reste des participants.</p>  |
| Sources       | <p>(Barreiro et al., 2017; Bocquentin, Vuillet, Cariolet, Diab, et al., 2020; Chelleri &amp; Fontanals, 2014; Hilly et al., 2018; Puig et al., 2019). Formation certifiante de 30h en ligne sur la résilience et le logiciel Hazur, effectuée en octobre-novembre 2016.</p>   |

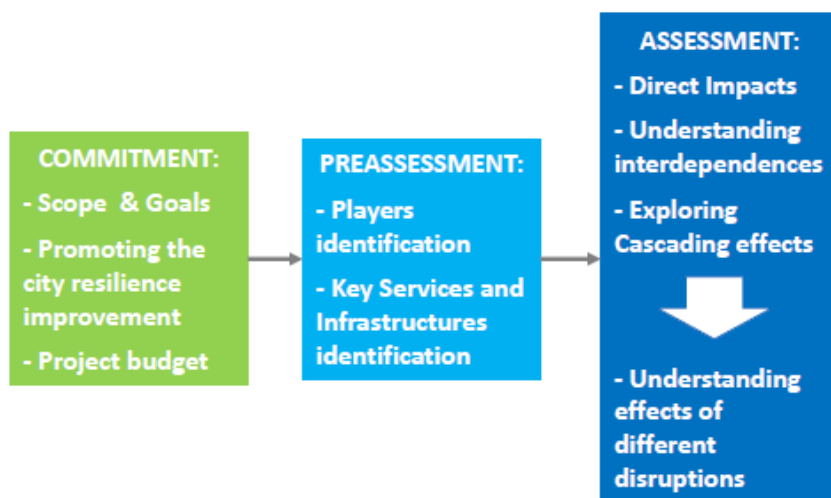


Figure 172 : Représentation schématique du processus développé dans le cadre de l'approche Hazus. Source : (Puig et al., 2019).

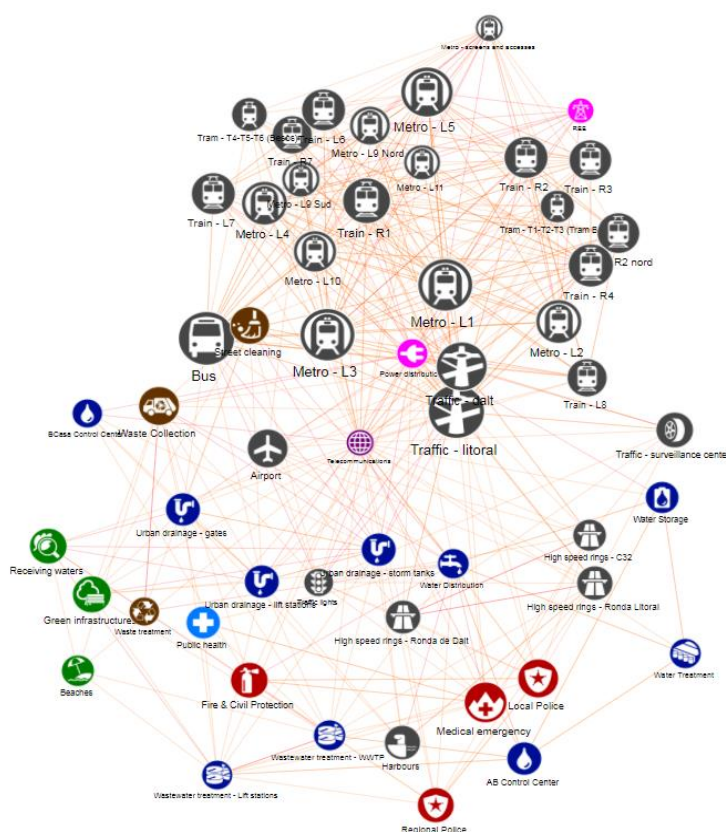


Figure 173 : Représentation graphique des liens de dépendances identifiés entre les différents services/réseaux urbains et leurs infrastructures. Source : (Barreiro et al., 2017).

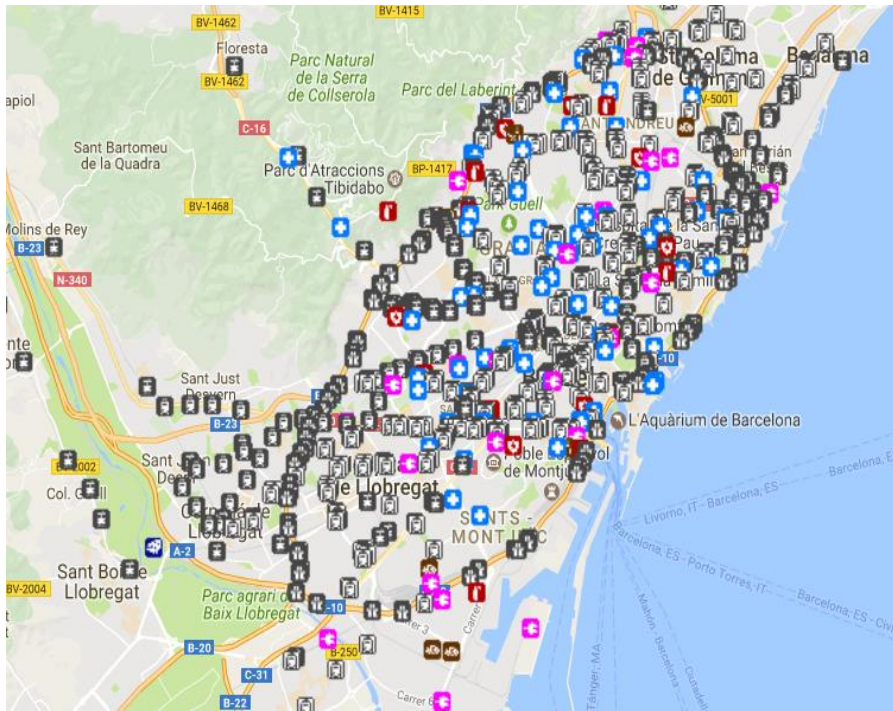


Figure 174 : Représentation SIG des liens de dépendances identifiés entre les différents services/réseaux urbains et leurs infrastructures. Source : (Barreiro et al., 2017).

## 1.6. Resilis

Tableau 67 : Présentation de l'approche RESILIS.

| CARACTERISTIQUE   | DESCRIPTION  |
|-------------------|--|
| Cadre et porteurs | Cette approche s'inscrit au sein d'un projet de recherche ANR AAP Ville Durable 2009 « RESILIS », qui a notamment donné lieu à une thèse à l'EIVP et à l'université Paris Diderot, en contrat « Cifre » avec EGIS entre 2010 et 2014 (à vérifier). D'autres organismes de recherche comme l'IRSTEA étaient partenaires.  |
| Objectifs         | <p>Les objectifs affichés étaient de développer des méthodes et des outils pour préparer, adapter et concevoir des systèmes sociaux et techniques capables de supporter et d'absorber une perturbation afin de la surmonter. La thèse en elle-même s'est concentrée sur la construction d'une méthodologie d'aide à l'identification des interdépendances des services parisiens en cas d'inondation.</p> <p>Les objectifs méthodologiques identifiés sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Identifier les liens de dépendances</li> <li>• Les formaliser à différents niveaux de granularité (services et infrastructures)</li> </ul>   |
| Aléas             | Cette approche se concentre sur les inondations, mais pourrait théoriquement être applicable à d'autres types d'aléas.   |
| Objets            | Tous les réseaux techniques structurants peuvent être pris en compte.  |
| Architecture      | <p>Première étape de recension d'informations dans laquelle ont été compilées et analysées les interdépendances des services urbains parisiens, et qui identifie notamment la dépendance forte à l'électricité, aux télécommunications et aux déplacements. La deuxième étape propose ensuite la reconstitution d'un scénario d'inondation au sein d'un quartier parisien et ses effets sur les services urbains.</p> <p>Ces travaux se sont appuyés sur de nombreuses rencontres avec les acteurs locaux (d'abord des entretiens individuels puis trois ateliers collaboratifs) et ont été facilités par le soutien de la Ville de Paris au sein du projet « Paris Résiliente ».</p> <p>Toubin a tout d'abord réalisé des portraits sectoriels des besoins pour chaque opérateur, puis une deuxième étape plus fine avec l'étude des réactions prévues jour après jour dans le scénario de la crue centennale pour les 12ème et 13ème arrondissements =&gt; échelle globale des dépendances et échelle fine de la cohérence des réactions.</p> <p>Les difficultés rencontrées par les gestionnaires des réseaux parisiens ont été classées et priorisées, et l'analyse des solutions potentielles a donné lieu à une liste de solutions mises en œuvre à Paris.</p> |

|               |  |
|---------------|--|
|               | Différenciation de l'échelle d'action avec l' « avant » (supra agglomération, au minimum le département) et le « pendant-après » (agglomération).  |
| Interface     | Livrables opérationnels pour les utilisateurs finaux des différents échelons de gestion et de gouvernances. Modèle spatial qui conduit à une synthèse cartographique et à une modélisation de la résilience des réseaux sous web-SIG. Pas d'outil opérationnel en tant que tel.  |
| Mise en œuvre | La démarche a été testée avec 2 collectivités partenaires : l'agglomération Orléans-Val de Loire et la ville de Mantes-la-Jolie. Elle a également été appliquée au niveau des infrastructures des 12ème et 13ème arrondissements de Paris. Egis l'a apparemment utilisée à quelques autres reprises dans le cadre de contrats.   |
| Données       | Les données utilisées sont relatives aux liens de dépendances observés au sein des services urbains, à l'échelle des services et parfois à l'échelle des infrastructures. Elles sont renseignées au sein de formulaires présentés à la Figure 175, qui alimentent ensuite une base de données. Les incertitudes ne sont pas prises en compte mais des intervalles sont proposés pour certaines grandeurs, notamment temporelles. |
| Sources       | (Oger, 2012; Toubin, 2014; Toubin et al., 2013, 2014).   |

|                      |                 | DIAGNOSTIC                                |             |           | EVALUATION                         |                           |                           |
|----------------------|-----------------|---|-------------|-----------|------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Ressources utilisées |                 | Préciser (nature, quantité, localisation) | Fournisseur | Autonomie | Délai de remise en service système | Fiabilité de la ressource | Criticité pour le système |
|                      |                 |   |             |           |                                    |                           | en situation normale      |
|                      |                 |   |             |           |                                    |                           | en situation perturbée    |
| Internes             | personnel       |   |             |           |                                    |                           |                           |
|                      | biens           |   |             |           |                                    |                           |                           |
|                      | infrastructures |   |             |           |                                    |                           |                           |
|                      | données         |   |             |           |                                    |                           |                           |
| Externes             | matière         |   |             |           |                                    |                           |                           |
|                      | infrastructures |   |             |           |                                    |                           |                           |
|                      | énergie         |   |             |           |                                    |                           | indispensable             |
|                      | eau             |   |             |           |                                    |                           | importante                |
|                      | réseau TIC      |   |             |           |                                    |                           | peu importante            |
| service              |                 |   |             |           |                                    |                           | négligeable               |
|                      | ...             |   |             |           |                                    |                           | inconnu                   |

Figure 175 : Formulaire à destination des opérateurs, pour l'évaluation et le renseignement des dépendances internes et externes. Source : (Toubin, 2014).

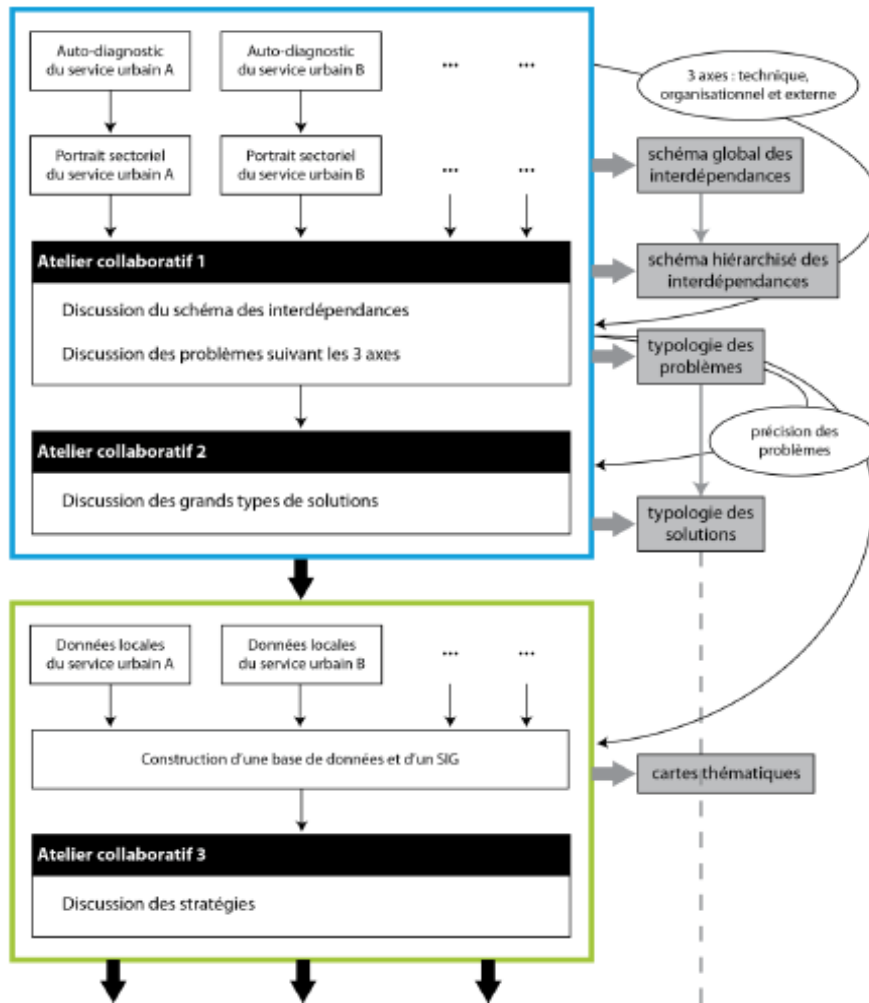


Figure 176 : Démarche méthodologique de l'approche développée, à l'échelle du service et du quartier. Source : (Toubin, 2014).

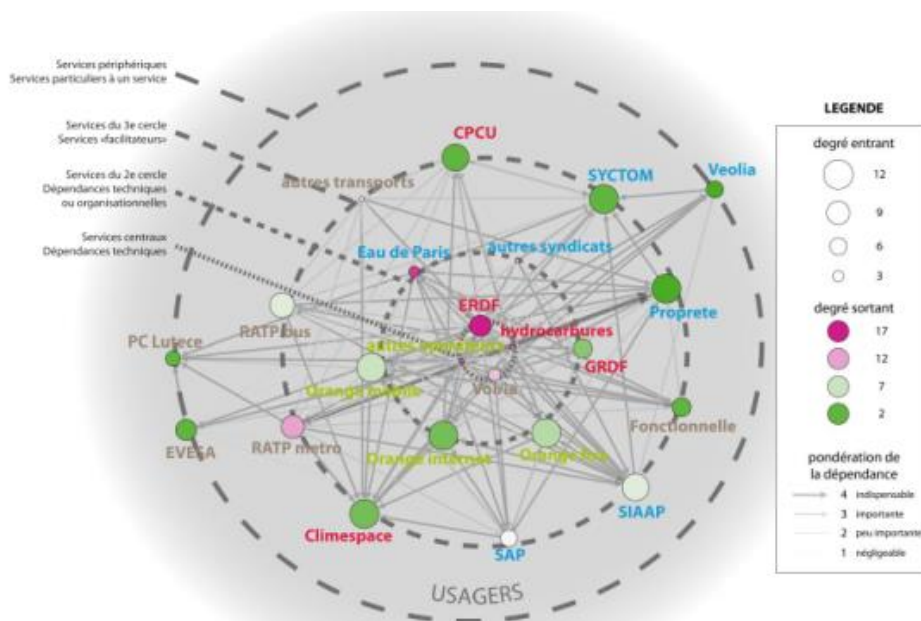


Figure 177 : Représentation graphique des liens de dépendances identifiées entre les différents services urbains. Source : (Toubin, 2014).

## 1.7. RESCCUE

Tableau 68 : Présentation du projet RESCCUE.

| CARACTERISTIQUE   | DESCRIPTION   |
|-------------------|---|
| Cadre et porteurs | RESCCUE est un projet de recherche européen financé par le programme H2020, et porté par Aquactec-Suez Advanced Solutions. Il s'intitule : "Resilience to cope with Climate Change in Urban Areas – a multisectorial approach focusing on water" et rassemble des instituts de recherche, des villes européennes, des entreprises de services urbains... Le projet a démarré en 2016, pour une fin prévue en 2020.  |
| Objectifs         | <p>Les objectifs affichés sont tout d'abord d'aider les villes à devenir plus résistantes aux défis physiques, mais aussi sociaux et économiques, en créant des modèles et des outils applicables à différents types de villes, touchés de différentes façons par le changement climatique. Un objectif plus opérationnel est d'accompagner les villes à la construction de leurs plans de résilience. Ce projet vise également à valider et améliorer un outil spécifique existant (HAZUR®) pour évaluer la résilience urbaine par rapport aux différents aléas et changements climatiques, en fonction de l'interaction entre les différents services urbains.</p> <p>Concernant la problématique des interdépendances et des défaillances en cascade, qui ne représente qu'une partie du projet, on identifie les objectifs suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• L'identification des liens d'(inter)dépendances</li> <li>• La formalisation de ces liens</li> <li>• La modélisation des relations entre les systèmes</li> <li>• La représentation des scénarios induits (absence de réelle simulation)</li> <li>• L'aide au choix de solutions adaptées (?) avec l'exploration et l'évaluation des impacts de différentes mesures d'adaptation.</li> </ul> |
| Aléas             | Cette initiative s'intéresse aux aléas climatiques dus au changement climatique : inondation pluviale, marine et fluviale ; sécheresse ; montée des eaux ; érosion côtière ; canicule.  |
| Objets            | Les objets pris en compte pour l'étude des interdépendances et des effets cascade sont les services urbains au sens large. Un focus est cependant fait sur les réseaux d'eaux, centraux au projet.  |
| Architecture      | <p>L'outil HAZUR® est censé être amélioré, avec des modules spécifiques concernant les scénarios de changement climatique et les mesures d'adaptation, et sera mis à jour dans l'optique de devenir un outil plus opérationnel.</p> <p>Nous pourrions dire que le projet vise en réalité à faire évoluer HAZUR® d'une approche « ascendante » basée sur les retours des parties prenantes à une approche plus « fédératrice », comprenant les résultats et les données d'outils</p>   |



|               |   |
|---------------|---|
|               | <p>analytiques plus ou moins sectoriels Il serait alors envisageable d’obtenir une véritable vision systémique des situations complexes, et de pouvoir se focaliser sur plusieurs échelles géographiques, technologiques et organisationnelles en fonction du contexte.</p> <p>Ce projet rassemble dans une optique fédératrice différentes initiatives indépendantes de simulateurs sectoriels (d’aléas et de réseaux), tels que des simulateurs d’inondations mais aussi des logiciels sectoriels simulant le fonctionnement des réseaux d’eau, et d’outils ascendants tels que Hazur.</p> <p>Les modèles utilisés, et améliorés, s’intéressent notamment à :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• la modélisation en deux dimensions des flux surfaciques de l’inondation,</li> <li>• la modélisation unidimensionnelle du réseau d’évacuation des eaux usées,</li> <li>• la modélisation des dégâts affligés aux bâtiments selon la hauteur de l’eau,</li> <li>• la modélisation du trafic routier (couplé aux modèles d’inondation).</li> </ul> <p>Outre les nouveaux modules concernant les stratégies et les scénarios de changement climatique, des améliorations des futures versions du logiciel intégrant les retours des implémentations sont prévues concernant l’interface et les importations et exportations de données, les fonctionnalités SIG (géotraitement, formats, étiquetage, éléments linéaires, vue satellite), les redondances (partielles, internes, entre services et entre infrastructures de services différents), les interdépendances (dépendantes du scénario, parmi les infrastructures d’un même service), les outils pour suivre les projets et mesures d’amélioration et pour améliorer les capacités de surveillance et de simulation.</p> <p>Les connaissances acquises grâce à l’analyse holistique au sein de l’outil HAZUR® peuvent être ensuite intégrées dans les modélisations physiques selon une approche cyclique. Elles permettent alors d’obtenir des informations plus détaillées concernant les impacts pouvant résulter de défaillances en cascade et concernant les moyens à travers lesquels il serait possible d’améliorer la résilience des villes.</p> |
| Interface     | <p>La question de l’interface est complexe pour l’approche RESCCUE, car celle-ci est composée de multiples briques et modules. Il n’existe à ce jour pas d’interface commune, et les échanges de données et résultats se font pour la majorité manuellement.</p> <p>Les acteurs opérationnels sont censés interagir principalement avec l’interface de l’outil Hazur, qui se veut facile à prendre en main.</p>   |
| Mise en œuvre | <p>3 sites d’étude ont été sélectionnés pour le développement et le test de l’approche holistique RESCCUE : Barcelone, Lisbonne et Bristol. Le processus d’amélioration de l’outil HAZUR, étudié plus haut, est notamment alimenté selon les retours des trois villes d’étude.</p>  |
| Données       | <p>Les données utilisées au sein de cette approche sont très diverses. Elles reprennent tout d’abord les données nécessaires au fonctionnement d’Hazur, vues précédemment. Elles concernent également le renseignement des différents</p>   |

modèles sectoriels (aléas et réseaux), c'est-à-dire des données plus techniques et plus détaillées concernant notamment les infrastructures.

Les incertitudes ne sont pas prises en compte en tant que telles. Mais pour les interdépendances inconnues il a été choisi d'appliquer la méthode des polygones de Thiessen, explicitée dans la Figure 181 ci-dessous, qui estime que la probabilité qu'une infrastructure soit dépendante d'une autre est proportionnelle à sa distance.

Sources

(Barreiro et al., 2017; Bocquentin, Vuillet, Cariolet, Diab, et al., 2020; Evans et al., 2018; Hilly et al., 2018; Velasco et al., 2018)

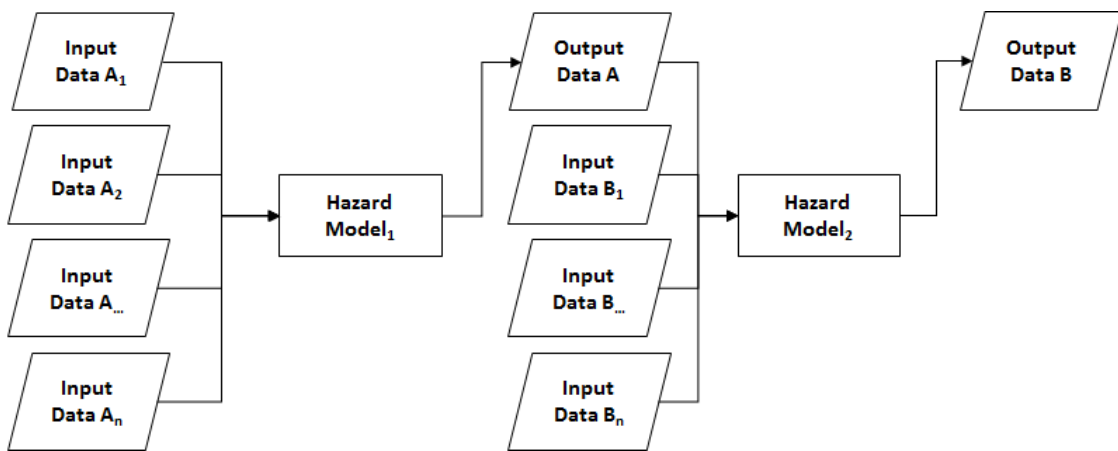


Figure 178. Schématisation d'un couplage de modèles d'aléas. Source : (Barreiro et al., 2017).

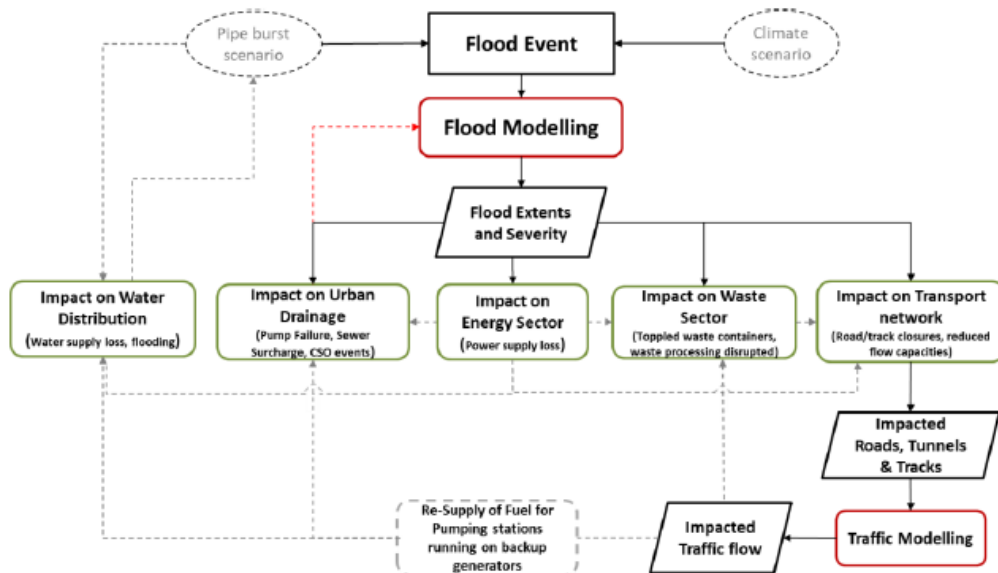


Figure 179 : Analyser les impacts en cascade d'une inondation au sein de différents services urbains. Source : (Evans et al., 2018).

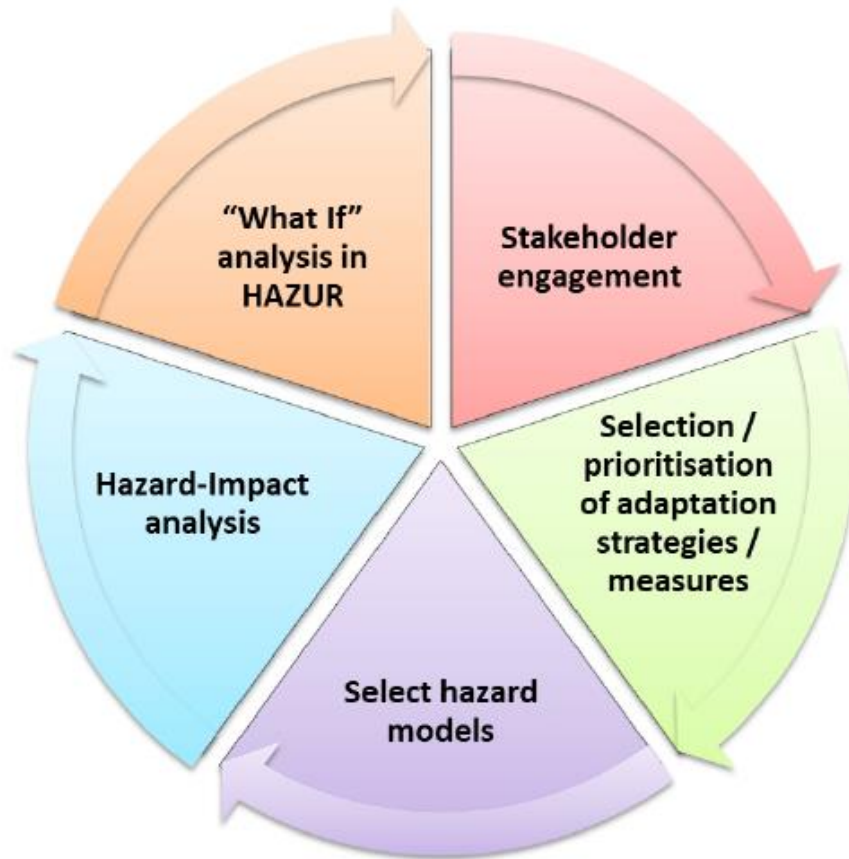


Figure 180 : Approche cyclique pour identifier les effets cascade tout en impliquant les parties prenantes. Source : (Evans et al., 2018).

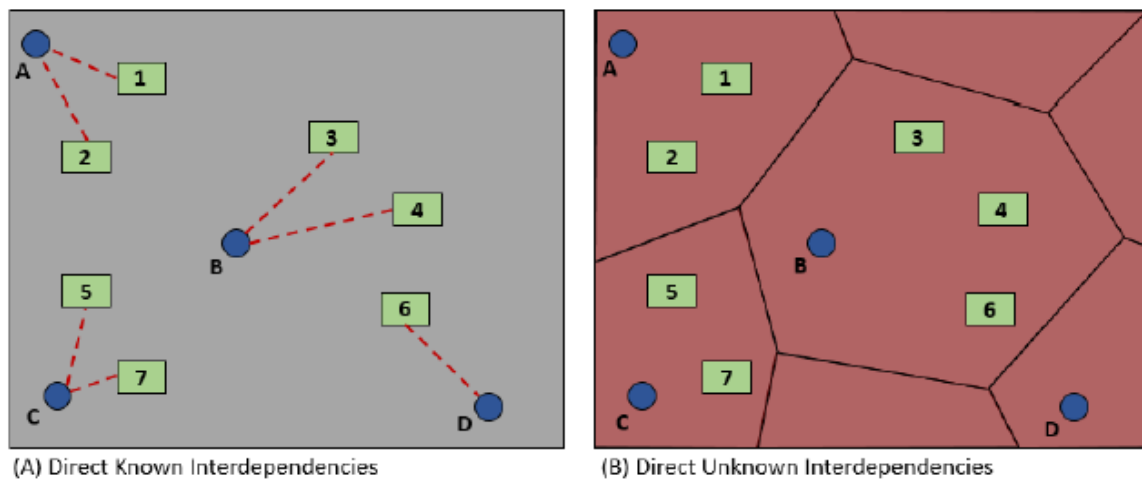


Figure 181 : Comparaison des interdépendances dans les cas où elles sont connues et dans le cas où elles sont inconnues et où la méthode des polygones est employée. Source : (Evans et al., 2018).

## 1.8. DIESIS

| CARACTERISTIQUE   | DESCRIPTION   |
|-------------------|---|
| Cadre et porteurs | DIESIS est un projet européen financé par le programme FP7 et intitulé "Design of an Interoperable European federated Simulation network for critical InfraStructures". Il est porté par FraunhoferIAIS, et rassemble TNO, Imperial College London, CRIAI (Campanian Consortium for Research in Informatics and Industrials automation, Italy), ENEA (Italian Agency for New Technologies, Energy and the Environment), EISAC (European Infrastructures Simulation and Analysis Center). Ce projet a été actif entre 2008 et 2012 mais certaines actions ont continué par la suite.   |
| Objectifs         | <p>Les objectifs poursuivis étaient la conception d'une nouvelle e-plateforme pour la recherche conjointe dans la protection des infrastructures critiques et pour favoriser le développement de nouvelles technologies pour la simulation des infrastructures critiques interopérables ; et la construction d'un outil fédérateur de simulation des défaillances entre les infrastructures critiques des réseaux structurants.</p> <p>Concernant la problématique des interdépendances et des défaillances en cascade au sein des réseaux techniques, on identifie les objectifs suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• L'identification des liens d'(inter)dépendances</li> <li>• La formalisation de ces liens</li> <li>• La modélisation des relations entre les systèmes</li> <li>• La modélisation des scénarios induits</li> <li>• L'aide au choix de solutions avec l'exploration et l'évaluation des impacts de différentes mesures d'adaptation</li> </ul> |
| Aléas             | Ce sont les catastrophes naturelles qui sont prises en compte prioritairement.  |
| Objets            | Les objets considérés sont les secteurs de transmission d'énergie, le réseau de télécommunications et les chemins de fer ainsi que leurs infrastructures pour le démonstrateur.   |
| Architecture      | <p>L'outil, basé sur le « What If Scenario Analysis », combine quatre simulateurs sectoriels :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Réseau d'électricité (SINCAL)</li> </ul> <p>« Graphical User Interface » semblable à un SIG. Peut gérer des réseaux comportant jusqu'à 50000 nœuds, modèle multidimensionnel du réseau. Tutoriels disponibles sur youtube.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Réseau de télécommunications (NS2)</li> </ul> <p>Logiciel de simulation des réseaux de télécommunications fonctionnant avec le langage de script TCL. On peut y représenter des réseaux avec des liens filaires ou sans fils, des machines et des routeurs (node), des flux TCP et UDP et sélectionner</p>  |

|               |   |
|---------------|---|
|               | <p>les politiques et règles régissant les files d’attentes mises en œuvre dans chaque nœud. L’outil de visualisation est ensuite NAM.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Chemins de fer (Opentrack)</li> </ul> <p>OpenTrack décrit des réseaux ferroviaires dans des graphes spéciaux dits à nœuds doubles. La topologie du réseau est créée et gérée à l'aide d'un éditeur graphique. Les objets graphiques sont caractérisés par des attributs comme par exemple la pente, la vitesse limite, etc. De plus, des objets logiques comme des itinéraires sont utilisés. OpenTrack offre des interfaces avec des formats courants (comme ASCII et XML).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Inondation (Aqua)</li> </ul> <p>Peu d’informations pertinentes disponibles.</p> <p>Il est précisé que théoriquement d’autres simulateurs sectoriels pourraient être ajoutés à l’approche DIESIS.</p> <p>Il faut alors faire les liens entre le temps, les données, les fonctions et le contrôle. Une solution « Knowledge Based System » (approche top-down) qui utilise des ontologies et des règles dans une approche hybride est utilisée. La combinaison de simulateurs sectoriels est modélisée comme un système de systèmes, où chaque simulateur sectoriel peut être considéré comme indépendant dans ses fonctions et ses objectifs mais comme connecté et inter-opérant avec les autres simulateurs.</p> <p>Un module de contrôle DIESIS est construit pour la synchronisation et pour l’harmonisation des modèles, qui ne contient que les éléments des infrastructures critiques pertinents. Utilisation de « WONT » (World ONTOlogy) qui fournit des définitions communes pour les termes des infrastructures critiques. Utilisation de « FONT » (Federation ONTOlogy) pour fédérer les IC, qui définit des interconnexions correctes de façon sémantique entre les IONT (Infrastructure ONTOlogy) - qui représentent le savoir sur les IC spécifiques et les règles. Des modèles d’interaction sont également créés, inspirés de «High Level Architecture» (HLA).</p> |
| Interface     | <p>Le « DIESIS interoperability middleware » tient lieu d’interlogiciel. Une différenciation de l’interopérabilité technique (liens entre données, temps, fonctions, contrôles) et sémantique est faite.</p> <p>Les composants TIC sont les suivants : module de visualisation ; base de données KBS (« Knowledge Based System », qui utilise des ontologies and des règles dans une approche hybride dans une approche top-down), serveur KBS ; module de contrôle FCM ; interlogiciel.</p>  |
| Mise en œuvre | <p>Un démonstrateur a été réalisé pour une partie de ses concepts techniques. Le démonstrateur comprend les 3 simulateurs de réseaux sectoriels étudiés et un simulateur simple d’inondation. Le scénario simulé est une perturbation des services critiques dans une région urbaine d’Europe suite à une inondation locale. Il a apparemment été testé sur un quartier de Rome.</p>  |

Données

Les données utilisées sont les données d'entrées des différents simulateurs sectoriels. Il faut donc gérer l'intégration des données et leur conversion, la synchronisation, et créer une interface commune. Ces données sont nombreuses, détaillées, et la compréhension et le maîtrise des simulateurs est nécessaire.

Sources

(Beyer et al., 2010; Flammini et al., 2009; Masucci, 2012; Rome et al., 2009)

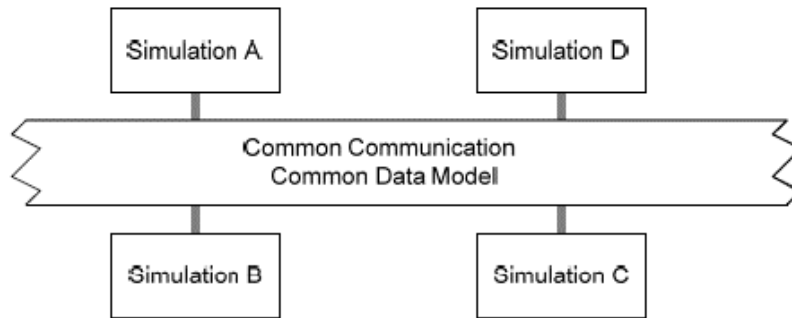


Figure 182 : Approche classique d'uniformisation des communications et de la forme des données. Source : (Beyer et al., 2010)

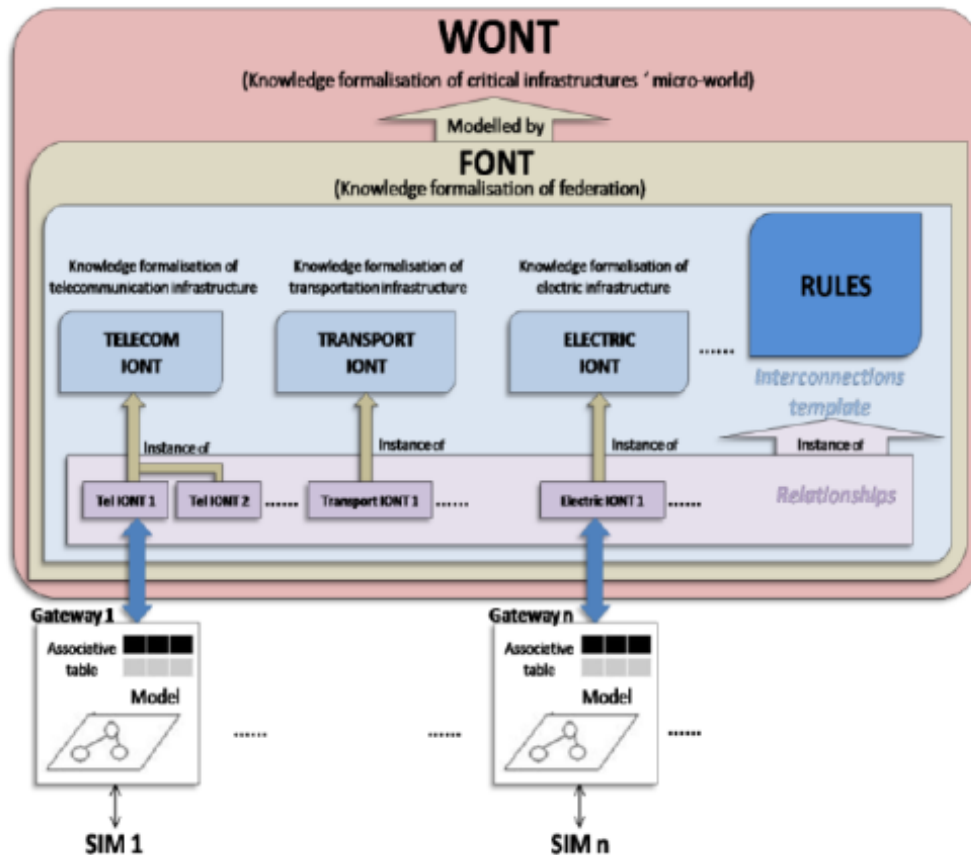


Figure 183 : Le système d'ontologies utilisé. Source : (Flammini et al., 2009)

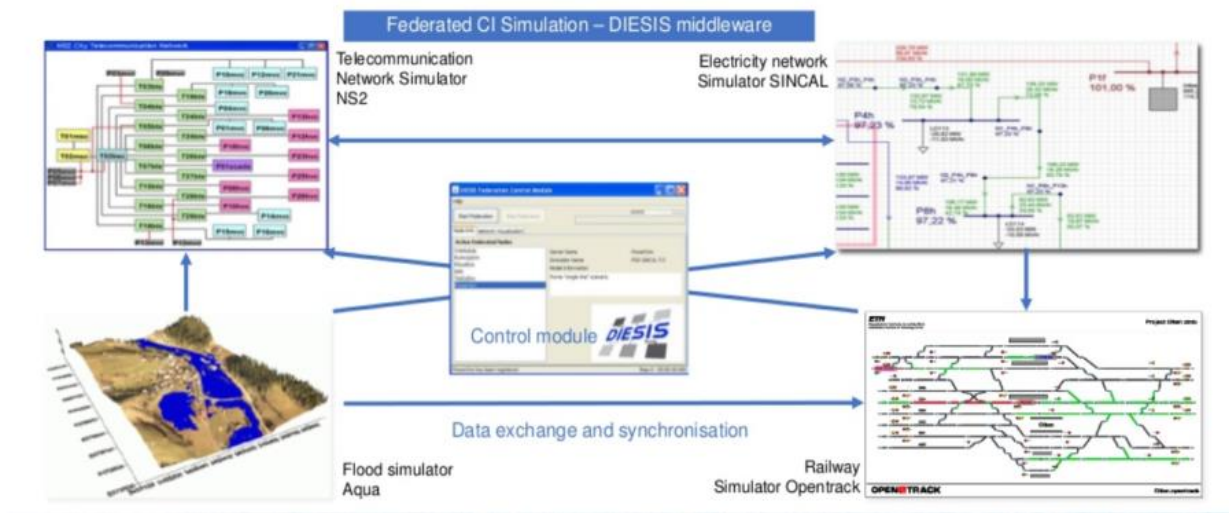


Figure 184 : Schématisation du fonctionnement de DIESIS et de ses composants. Source : (Rome et al., 2009)

## 1.9. NISAC

Tableau 69 : Présentation des initiatives portées par le NISAC.

| CARACTERISTIQUE   | DESCRIPTION   |
|-------------------|---|
| Cadre et porteurs | <p>L'initiative présentée ci-dessous est portée par le laboratoire national américain Argonne, qui est un centre très important de recherche scientifique géré par l'Université de Chicago pour le Ministère de l'Énergie. Une branche de ce centre s'intéresse particulièrement à la protection des infrastructures critiques et aux ressources clés : le « Infrastructure Assurance Center ».</p> <p>Depuis 2015 a été lancée la « Resilient Infrastructure Initiative », qui se concentre sur la modélisation des (inter)dépendances et des défaillances en cascade.</p>   |
| Objectifs         | <p>Les objectifs affichés sont de fournir des méthodologies, des informations, des analyses, des outils et des technologies pour éclairer les décisions relatives à la protection et à la résilience des infrastructures. Certains projets visent notamment à modéliser et analyser les infrastructures et leurs interdépendances, à visualiser sous forme géographique les résultats, et à aider à la décision.</p>  |
| Aléas             | <p>Tous les aléas doivent potentiellement être pris en compte pour cette approche qui se veut applicable à toutes les infrastructures critiques américaines.</p>  |
| Objets            | <p>Les catégories d'infrastructures considérées sont multiples : énergie, transport, banques et finances, agriculture et nourriture, eau, santé, services de secours, défense, technologies de l'information, (télé)communications, installations commerciales, barrages, installations nucléaires, livraisons, industrie chimique, monuments nationaux, institutions gouvernementales...</p> <p>Au niveau des bâtiments, les interdépendances majeures étudiées sont celles relatives à l'électricité, à l'eau potable, à l'assainissement et aux télécommunications.</p> <p>On identifie finalement les objectifs suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• L'identification des liens d'(inter)dépendances</li> <li>• La formalisation de ces liens</li> <li>• La modélisation des relations entre les systèmes</li> <li>• La représentation des scénarios induits (absence de réelle simulation)</li> <li>• L'aide au choix de solutions adaptées, avec l'exploration et l'évaluation des impacts de multiples mesures d'adaptation.</li> <li>• L'étude des phases de restauration et réparation pour l'aide à la décision</li> </ul> |
| Architecture      | <p>Cette approche complexe et multiforme se fonde sur une caractérisation rigoureuse des phénomènes d'interdépendance considérés comme dynamiques. Elle se veut multi-scalaire, passant de l'échelle (multi)nationale à locale selon les enjeux étudiés.</p>  |



|               |  |
|---------------|--|
|               | <p>Les différents modules sont présentés ci-dessous et représentés au sein de la Figure 185.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Une analyse de la situation initiale est tout d’abord réalisée, se concentrant sur les aléas et les menaces, les infrastructures et les impacts potentiels.</li> <li>• Les outils d’analyse des interdépendances (pour certains inspirés des travaux du CRP à Montréal) et des défaillances ont ensuite pour ambition de faciliter leur compréhension et leur propagation, d’identifier les composants critiques, de déterminer les conséquences des perturbations, et de permettre les analyses « what-if ».</li> <li>• Des outils sectoriels tels que EPFast et NGFast ont également été améliorés pour permettre la modélisation itérative des cascades au sein de systèmes énergétiques spécifiques (électricité et gaz) et peuvent être ensuite fédérés, en étant nourris par les données issues des analyses précédentes.</li> <li>• Des outils de visualisation des interdépendances et des scénarios de cascade ont été développés, tels que CAS Visualization.</li> <li>• Un outil portant sur la phase de réparation et de restauration et les incertitudes associées a également été développé sous le nom de restore.</li> </ul> <p>L’architecture est voulue flexible et modulable, permettant l’intégration future de nouveaux éléments.</p> |
| Interface     | <p>Plusieurs interfaces sont disponibles, certaines pour lesquelles nous n’avons pas d’informations (notamment l’interface centrale) et d’autres qui sont publiques, telle que l’interface du tableau de bord de l’indice de résilience présenté à la Figure 187.</p>  |
| Mise en œuvre | <p>Différentes expérimentations ont été réalisées - avec un ou plusieurs modules - sur différents territoires, principalement américains, et à différentes échelles (villes et états notamment). Peu de résultats sont publics, s’ils ne figurent pas dans des publications scientifiques.</p>   |
| Données       | <p>Les données nécessaires à l’étape préalable de l’analyse vont renseigner sur les aléas, les infrastructures et les courbes de fragilité ainsi que les codes du bâtiment et de la construction pour définir la façon dont les infrastructures vont être impactées par les événements.</p>  |
| Sources       | <p>(Frédéric Petit et al., 2014; Phillips &amp; Tompkins, 2014; E. Portante et al., 2016; E. C. Portante et al., 2011)</p>   |



Figure 185 : Schématisation du processus de l'évaluation prévisionnelle des infrastructures. Source : (E. Portante et al., 2016)

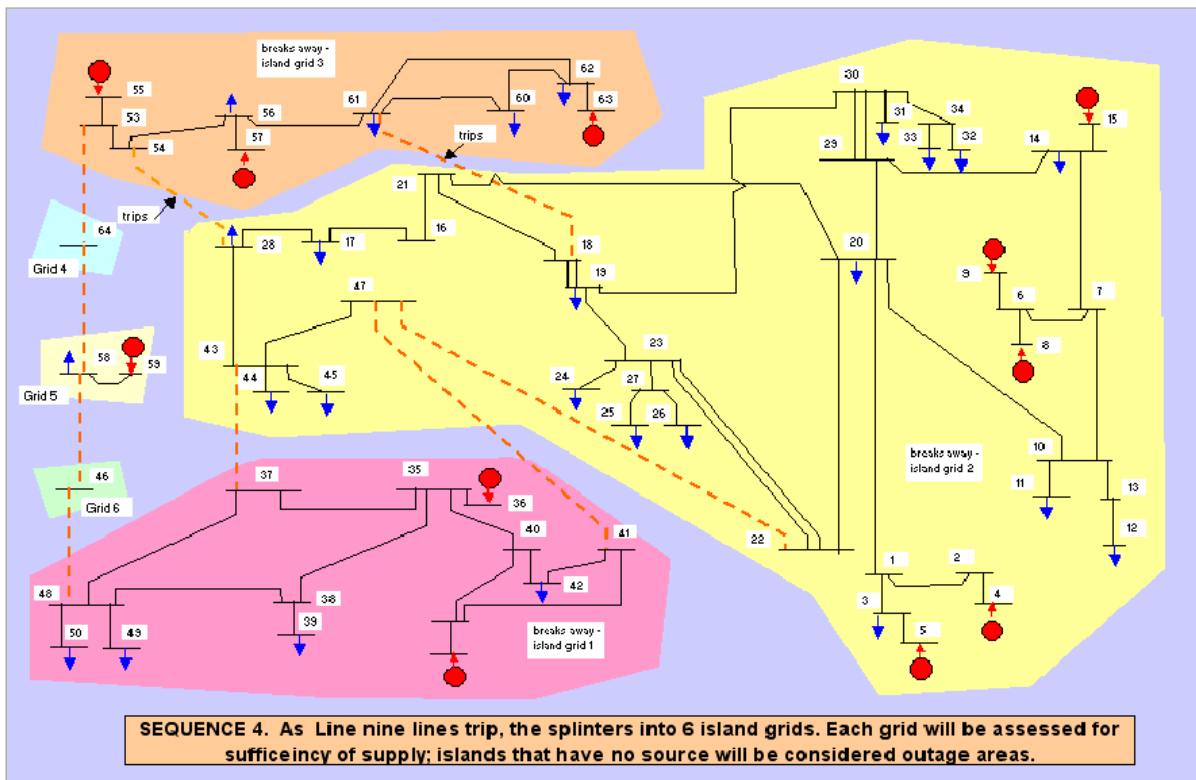


Figure 186 : Interface de l'outil EPFast. Source : (E. Portante et al., 2016).

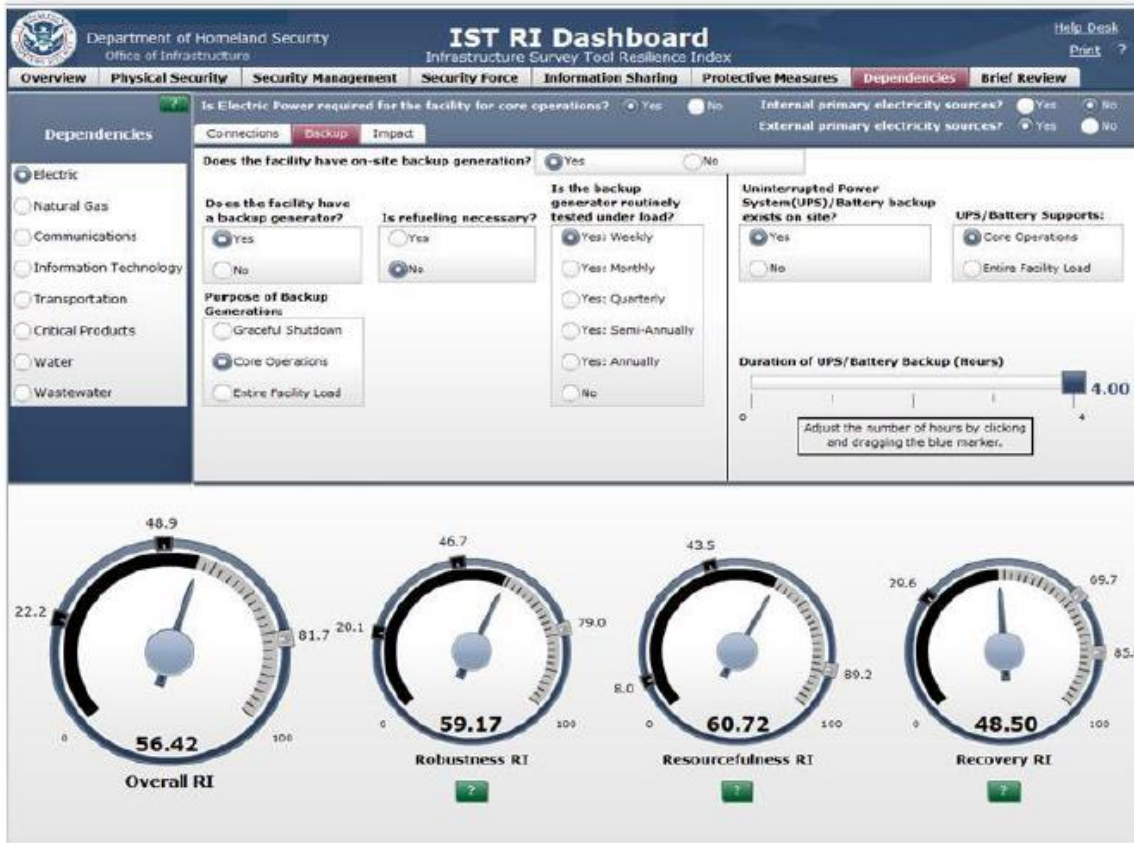


Figure 187 : Tableau de bord de l'indice de résilience. Source : (Phillips & Tompkins, 2014)

## 2. RETOUR SUR LA CRUE DE JANVIER 1910

Entre le 19 et le 28 janvier 1910, la Seine a connu une crue centennale (de période de retour égale à cent ans) qui reste une référence plus d'un siècle plus tard. Des précipitations importantes sont tout d'abord observées durant les mois de septembre et octobre 1909, durant lesquels il est tombé près de deux fois plus de pluie qu'en moyenne. Ces pluies reprennent ensuite en décembre, gorgeant les sols en amont de Paris. Le 31 décembre, la station de Paris-Austerlitz indique un niveau d'eau de 3,45 m. Les pluies reprennent en janvier et des crues au niveau de l'Yonne, du Loing et du Grand-Morin débudent, de même que des crues exceptionnelles de la Haute-Seine et de la Marne. Les précipitations continuent de façon régulière, ainsi qu'une fonte des neiges, et la Seine atteint 5,93 m au pont d'Austerlitz le 22 janvier et finalement la cote maximale de 8,62 m le 28 janvier.

La partie amont de Paris est la plus inondée, notamment les territoires allant de Villeneuve-Saint-Georges à l'entrée de Paris ou la commune d'Alfortville, comme le montre la Figure 188. A l'aval de Paris, ce sont Gennevilliers, Boulogne et Clichy qui sont les plus impactées par la montée des eaux. Des milliers d'habitants sont évacués. La décrue est assez rapide dans les jours suivants puis ralentit, et la Seine ne retrouve sa hauteur d'eau habituelle autour de 2,5 mètres que le 16 mars 1910 (Nouaillhac-Pioch & Maillet, 1910).

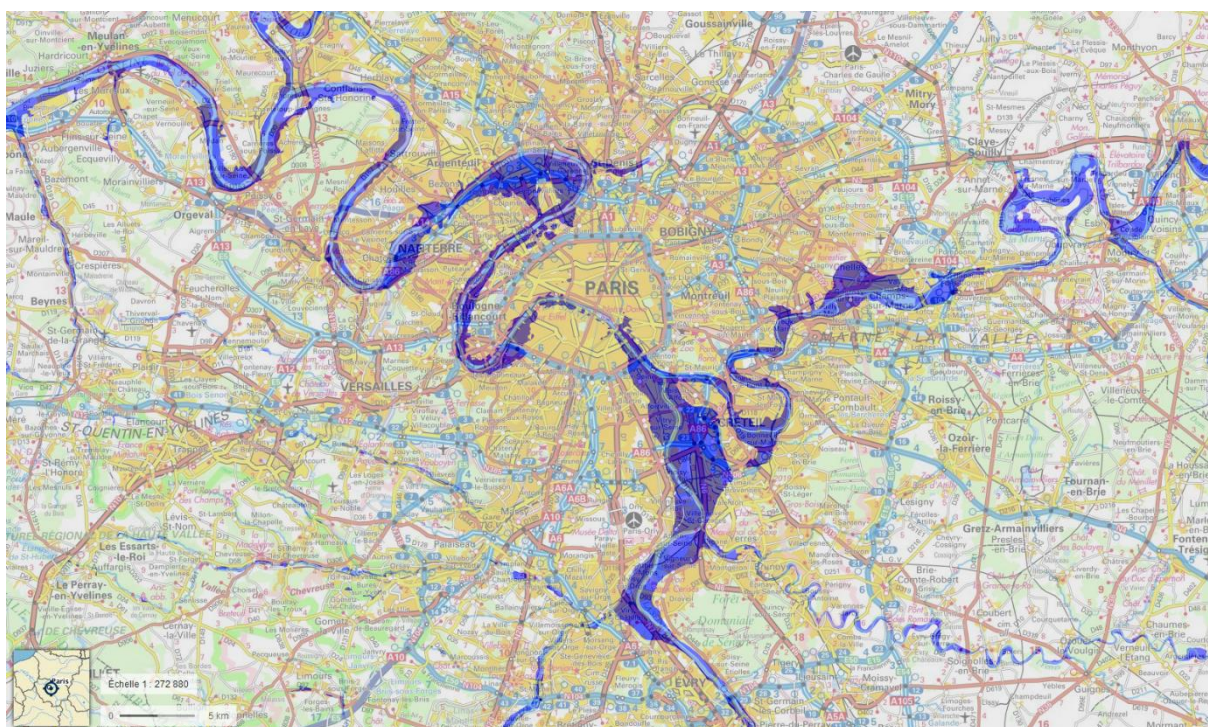


Figure 188 : Cartographie des zones inondées durant la crue de 1910. Source : Géoportail (<https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/crues-du-bassin-de-la-seine-pec>).

Cette crue est aujourd'hui une référence, illustrée notamment par de nombreuses photographies et cartes postales comme la Figure 189, que ce soit pour les gestionnaires de réseaux techniques urbains ou pour les institutions et collectivités. Elle sert ainsi de base à la définition des scénarios DRIEE utilisés par tous.

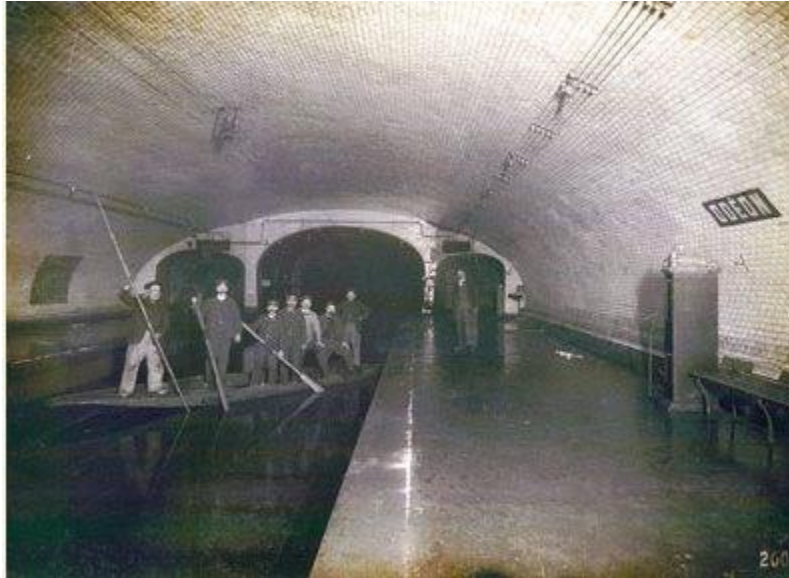


Figure 189 : Barque sur une voie de la station de métro Odéon. Crédits : Patrice Clavier / Archives départementales de Paris.

Grâce au système de prévisions s'appuyant sur un réseau de stations de mesure des cours d'eaux et des précipitations, des moyens ont pu être mobilisés de façon préventive. De nombreux rapports documentent aujourd'hui les actions et mesures mises en place, mais aussi les réflexions des parties prenantes à la suite de l'événement (Nouaillhac-Pioch & Maillet, 1910; Picard, 1910). Les analyses ici présentées sont basées principalement sur les rapports de la Commission Inondation de l'époque (Picard, 1910) et les travaux de synthèse et de recherche plus ou moins récents (Ambroise-Rendu, 1997; Nouaillhac-Pioch & Maillet, 1910; Gallois, 1911; Marti & Lepelletier, 1997; Toubin, 2014).

Le Tableau 70 ci-dessous reprend les éléments des rapports produits en 1910 par la Commission des Inondations à la suite de la crue, concernant notamment les dysfonctionnements recensés au sein des différents réseaux urbains présents à l'époque. La majorité des informations recueillies portent sur le territoire parisien et ne peuvent refléter la situation francilienne.

Tableau 70 : Défaillances recensées au sein des réseaux techniques urbains lors de la crue de janvier 1910.

| Réseau                     | Défaillances et solutions palliatives  | Cascades   |
|----------------------------|--|--|
| Distribution d'électricité | La distribution d'électricité est alors gérée par plusieurs opérateurs privés. Plusieurs usines de production d'électricité dysfonctionnent ou sont arrêtées, ainsi que les sous-stations et transformateurs correspondants. Le service est perturbé pendant 6 jours, et le retour à la normale est estimé à 1 mois selon les opérateurs.<br>19 communes du département de la Seine ont été privées de gaz ou d'électricité. | Le réseau de tramway est perturbé par les coupures d'électricité (ou de vapeur), de même que le réseau de métro.<br>Le poste central des télégraphes centralisant les communications doit fonctionner manuellement (pour Paris, la banlieue n'étant plus desservie) du fait de l'inondation et donc de la coupure de ses installations électriques en sous-sol.<br>L'arrêt de la distribution d'électricité entraîne l'arrêt des usines de production de gaz, encore très utilisé. |
| Chauffage urbain           | Le chauffage urbain est coupé quelques jours, sachant que la crue a lieu durant un épisode de froid et de neige importante.  |  |

|                      |   |  |
|----------------------|---|--|
| Télécommunications   | <p>Le poste central des télégraphes centralisant les communications doit fonctionner de façon dégradée et manuellement (pour Paris, la banlieue n'étant plus desservie) du fait de l'inondation et donc de la coupure de ses installations électriques en sous-sol. Certaines communications ne seront pas rétablies avant un mois. Le réseau pneumatique a été très peu impacté, contrairement au réseau téléphonique pour lequel la majorité des arrondissements et la banlieue subissent des perturbations (jusqu'à un tiers des abonnés, c'est-à-dire 14 000 personnes à l'époque, sont coupés au 31 janvier).</p>  |  |
| Transports en commun | <p>Paris est très impactée au niveau des transports en commun, et ce pendant 7 jours en moyenne, bien que certaines lignes ne reprennent qu'au bout de 10 semaines. Les lignes de chemin de fers sont coupées et les dommages structurels et matériels sont importants. Un souterrain de chemin de fer en construction passant sous la Seine et rejoignant la gare Saint Lazare est inondé et amène l'eau jusqu'à ce quartier en cuvette.</p> <p>Les lignes de tramway sont perturbées, que ce soit par l'immersion des voies ou la rupture de l'alimentation en énergie (électricité ou air comprimé notamment). Des tramways à vapeur seront utilisés de façon palliative mais bientôt le manque de charbon et d'eau pure se fera sentir. Sur les 63 km de voies de métro, la moitié est inexploitable. Les chantiers de nouvelles lignes de métro telles que les 7, 8 et 3 sont également impactés. Les dysfonctionnements du métro font suite à des inondations, des infiltrations mais aussi à des coupures d'alimentation électrique.</p> |  |
| Réseau routier       | <p>De très nombreux axes sont immergés pendant plusieurs jours voire semaines. Plusieurs ponts sont fermés à la circulation, voire inondés, comme le pont d'Austerlitz, mais aucun ne rompt. Les pavés de bois ont été soulevés et seront remplacés par des pavés en pierre. La voirie s'effondre à certains endroits au-dessus des égouts.</p>   |  |
| Gaz                  | <p>La distribution de gaz par la Société du Gaz de Paris est coupée sur la majorité de la moitié Sud de Paris et quelques villes de la petite couronne, suite à l'inondation d'une partie du réseau (environ 10%) et l'endommagement des installations (par rupture de conduites notamment). L'approvisionnement en charbon par le fleuve est également perturbé et entraîne la diminution de la production au niveau des usines.</p> <p>19 communes du département de la Seine ont été privées de de gaz ou d'électricité.</p>   | <p>L'arrêt de la distribution de gaz impacte l'éclairage public durant 4 jours. Aux lampadaires éteints sont accrochés des lampes à pétrole ou alcool.</p> |
| Eau                  | <p>L'alimentation en eau potable à Paris, s'appuyant sur un réseau encore peu développé, n'a pas failli durant la crue. Des pollutions de l'eau ont tout de même été observées.</p>   |  |

|                |  |   |
|----------------|--|---|
|                | Une vingtaine de communes du département de la Seine a été coupée en eau potable.  |   |
| Assainissement | Les réseaux d'égouts dont la majorité des canalisations a été récemment installée sont sur-sollicités et entraînent des rejets et quelques effondrements (voir Figure 190), mais la majorité du réseau continue à jouer son rôle. Certains immeubles n'étaient pas encore raccordés et l'évacuation de leurs fosses de vidange a été longue et laborieuse.   |   |
| Déchets        | La collecte et le traitement des déchets a subi différents dysfonctionnements sur la quasi-totalité des arrondissements parisiens, au niveau des accès mais aussi au niveau des usines de traitement de Issy-les-Moulineaux, Saint-Ouen et Vitry-sur-Seine qui ont été inondées ou inaccessibles. Le site de Romainville ne suffit plus et est trop éloigné. De nombreux déchets ont été rejetés directement dans le fleuve en crue au niveau de deux ponts. |   |
| Air comprimé   | Le réseau d'air comprimé subit d'importantes perturbations, que ce soit au niveau de l'usine de production ou des canalisations placées dans les égouts.   | Certaines lignes de tramway fonctionnant à l'air comprimé sont également impactées par les défaillances de l'approvisionnement. Cet air comprimé servait également à faire fonctionner les 6000 horloges publiques sur les trottoirs ainsi que 4000 ascenseurs. |



Figure 190 : Effondrement du boulevard Haussmann provoqué par la rupture du grand égout. Crédits : World's Graphic Press.

Les dommages pour le département de la Seine, qui englobait à l'époque les actuels Val-de-Marne, Hauts-de-Seine et Seine-Saint-Denis, est estimé à 8 milliards de francs (1997). Il n'existe pas d'estimation globale des dommages pour Paris intra-muros.

### 3. QUESTIONNAIRE PRINCIPAL

Le questionnaire en ligne réalisé sous Google Forms, dont un extrait est présenté ci-dessous, a été le support des entretiens avec les répondants de l'enquête menée auprès des opérateurs de réseaux franciliens. L'ensemble du questionnaire peut être communiqué si besoin.

**I. Etat des lieux : connaissance du réseau et du territoire, planification de la gestion de crise**

Dans cette section, l'objectif est d'identifier les connaissances actuelles concernant le réseau et ses vulnérabilités face à une inondation, ainsi que des outils utilisés et des échanges d'informations avec les autres acteurs.

**A/ Connaissance du réseau et du territoire**

**Infrastructures critiques**

1) Est-ce que certaines infrastructures sont identifiées comme critiques au maintien de votre activité parmi les infrastructures de votre propre réseau ?

Oui

Non

Je ne sais pas

Autre : \_\_\_\_\_

2) Si oui, pouvez-vous donner un exemple représentatif ?

\_\_\_\_\_  
Votre réponse



11) Avez-vous connaissance de réseaux...

|                                | ...dépendants du vôtre ? | ...dont vous êtes dépendants ? |
|--------------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| Réseau électrique              | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>       |
| Réseau routier                 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>       |
| Réseau d'eau potable           | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>       |
| Réseau d'assainissement        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>       |
| Réseau de gaz                  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>       |
| Réseau de télécommunications   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>       |
| Réseau de transports en commun | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>       |
| Réseau de fluides calorifiques | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>       |
| Réseau de gestion des déchets  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>       |
| Réseau d'hydrocarbures         | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>       |
| Autre                          | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>       |

#### 4. QUESTIONNAIRE ANNEXE

Le questionnaire annexe, dont un extrait est présenté ci-dessous, a été envoyé à la suite de l'analyse des premiers résultats pour éclaircir la question des cartographies de « vulnérabilité ». L'ensemble du questionnaire peut être communiqué si besoin.

**Cartographie des vulnérabilités**

Quel service est en charge de la création de vos cartes de vulnérabilité ? Avec quels services collabore-t-il ?

Votre réponse \_\_\_\_\_

Quel est le processus de mise à jour de cette cartographie en interne ?

Votre réponse \_\_\_\_\_

Quel est le processus de mise à jour de vos cartes sur la plateforme Alfresco ?

Votre réponse \_\_\_\_\_

Est-ce que l'ajout de nouvelles cartes ou de cartes mises à jour sur la plateforme Alfresco entraîne une mise à jour de vos études de vulnérabilité internes ?

Oui

Non

Cela dépend du type de cartes

Je ne sais pas