



HAL
open science

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

Amélie Grangeat

► To cite this version:

Amélie Grangeat. 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. Autre. Université de Lyon, 2016. Français. NNT : 2016LYSEM029 . tel-01665159

HAL Id: tel-01665159

<https://theses.hal.science/tel-01665159v1>

Submitted on 15 Dec 2017

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.



N° d'ordre NNT : 2016LYSEM029

THESE de DOCTORAT de L'UNIVERSITE DE LYON
opérée au sein de
l'École des Mines de Saint-Etienne

Ecole Doctorale N° 488
Sciences, Ingénierie, Santé

Spécialité de doctorat : Sciences et génie de l'environnement

Soutenue publiquement le 07/12/2016, par :
Amélie Grangeat

**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**

Devant le jury composé de :

Grillot, Didier DR École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne **Président**

Flaus, Jean-Marie. Enseignant Chercheur, Université Joseph Fourier, Grenoble **Rapporteur**

Van de Walle, Bartel. Associate Professor, Technica Univeisty of Delft, Pays-Bas

Rapporteur

Lapébie, Emmanuel, Ingénieur CEA Gramat **Examineur**

Eid, Mohammed, Ingénieur chercheur CEA Saclay **Examineur**

Dusserre, Gilles. DR, École Nationale Supérieure des Mines d'Alès **Directeur de thèse**

Bony Dandrieux, Aurélia. Maître Assistant, École Nationale Supérieure des Mines d'Alès

Encadrant

Tixier, Jérôme. Maître Assistant. École Nationale Supérieure des Mines d'Alès **Invité**

Lafontaine, Eric. HDR. DGA. **Invité**

Spécialités doctorales

SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX
MECANIQUE ET INGENIERIE
GENIE DES PROCÉDES
SCIENCES DE LA TERRE
SCIENCES ET GENIE DE L'ENVIRONNEMENT

Responsables :

K. Wolski Directeur de recherche
S. Drapier, professeur
F. Gruy, Maître de recherche
B. Guy, Directeur de recherche
D. Graillet, Directeur de recherche

Spécialités doctorales

MATHEMATIQUES APPLIQUEES
INFORMATIQUE
IMAGE, VISION, SIGNAL
GENIE INDUSTRIEL
MICROELECTRONIQUE

Responsables

O. Roustant, Maître-assistant
O. Boissier, Professeur
J.C. Pinoli, Professeur
X. Delorme, Maître assistant
Ph. Lalevée, Professeur

EMSE : Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'Etat ou d'une HDR)

ABSI	Nabil	CR	Génie industriel	CMP
AUGUSTO	Vincent	CR	Image, Vision, Signal	CIS
AVRIL	Stéphane	PR2	Mécanique et ingénierie	CIS
BADEL	Pierre	MA(MDC)	Mécanique et ingénierie	CIS
BALBO	Flavien	PR2	Informatique	FAYOL
BASSEREAU	Jean-François	PR	Sciences et génie des matériaux	SMS
BATTON-HUBERT	Mireille	PR2	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
BEIGBEDER	Michel	MA(MDC)	Informatique	FAYOL
BLAYAC	Sylvain	MA(MDC)	Microélectronique	CMP
BOISSIER	Olivier	PR1	Informatique	FAYOL
BONNEFOY	Olivier	MA(MDC)	Génie des Procédés	SPIN
BORBELY	Andras	MR(DR2)	Sciences et génie des matériaux	SMS
BOUCHER	Xavier	PR2	Génie Industriel	FAYOL
BRODHAG	Christian	DR	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
BRUCTION	Julien	MA(MDC)	Mécanique et ingénierie	SMS
BURLAT	Patrick	PR1	Génie Industriel	FAYOL
CHRISTIE	Frédéric	PR	Science et génie des matériaux	SMS
DAUZERE-PERES	Stéphane	PR1	Génie Industriel	CMP
DEBAYLE	Johan	CR	Image Vision Signal	CIS
DELAFOSSÉ	David	PR0	Sciences et génie des matériaux	SMS
DELORME	Xavier	MA(MDC)	Génie industriel	FAYOL
DESRAYAUD	Christophe	PR1	Mécanique et ingénierie	SMS
DJENIZIAN	Thierry	PR	Science et génie des matériaux	CMP
DOUCÉ	Sandrine	PR2	Sciences de gestion	FAYOL
DRAPIER	Sylvain	PR1	Mécanique et ingénierie	SMS
FAVERGEON	Loïc	CR	Génie des Procédés	SPIN
FEUILLET	Dominique	PR1	Génie Industriel	CMP
FORLÉST	Valérie	MA(MDC)	Génie des Procédés	CIS
FOURNIER	Jacques	Ingénieur chercheur CEA	Microélectronique	CMP
FRACZKIEWICZ	Anna	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
GARCIA	Daniel	MR(DR2)	Génie des Procédés	SPIN
GAVET	Yann	MA(MDC)	Image Vision Signal	CIS
GERINGER	Jean	MA(MDC)	Sciences et génie des matériaux	CIS
GOELURIOT	Dominique	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
GONDRAN	Natacha	MA(MDC)	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
GRAILLOT	Didier	DR	Sciences et génie de l'environnement	SPIN
GROSSEAU	Philippe	DR	Génie des Procédés	SPIN
GRUY	Frédéric	PR1	Génie des Procédés	SPIN
GUY	Bernard	DR	Sciences de la Terre	SPIN
LIAN	Woo-Suck	MR	Mécanique et ingénierie	SMS
HERRI	Jean Michel	PR1	Génie des Procédés	SPIN
KERMOUCHE	Guillaume	PR2	Mécanique et Ingénierie	SMS
KLOCKER	Tilmut	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
LAFORLÉSI	Valérie	MR(DR2)	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
LERICHE	Rodolphe	CR	Mécanique et ingénierie	FAYOL
MALLIARAS	Georges	PR1	Microélectronique	CMP
MOLIMARD	Jérôme	PR2	Mécanique et ingénierie	CIS
MOUTTE	Jacques	CR	Génie des Procédés	SPIN
NIKOLOVSKI	Jean-Pierre	Ingénieur de recherche	Mécanique et ingénierie	CMP
NORTIER	Patrice	PR1		SPIN
OWENS	Rosin	MA(MDC)	Microélectronique	CMP
PERES	Véronique	MR	Génie des Procédés	SPIN
PICARD	Gauthier	MA(MDC)	Informatique	FAYOL
PIJOLAT	Christophe	PR0	Génie des Procédés	SPIN
PIJOLAT	Michèle	PR1	Génie des Procédés	SPIN
PINOLI	Jean Charles	PR0	Image Vision Signal	CIS
POURCHEZ	Jérémy	MR	Génie des Procédés	CIS
ROBISSON	Bruno	Ingénieur de recherche	Microélectronique	CMP
ROUSSY	Agnès	MA(MDC)	Génie industriel	CMP
ROUSTANT	Olivier	MA(MDC)	Mathématiques appliquées	FAYOL
STOLARZ	Jacques	CR	Sciences et génie des matériaux	SMS
TRIA	Assia	Ingénieur de recherche	Microélectronique	CMP
VALDIVIESO	François	PR2	Sciences et génie des matériaux	SMS
VIRICELLE	Jean Paul	DR	Génie des Procédés	SPIN
WOLSKI	Krzysztof	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
XIE	Xiaolan	PR1	Génie industriel	CIS
YUGMA	Gallian	CR	Génie industriel	CMP

Mise à jour : 01/02/2016

Sommaire

Acronymes	vii
Remerciements	viii
Avant-propos	ix
Introduction et organisation de la thèse	1
Objectifs et démarche méthodologique (structure du mémoire)	2
1 Etude des effets cascade entre réseaux d'infrastructures et de leurs impacts sur la gestion de crise	6
1.1 Analyse des effets cascade lors de l'ouragan Sandy (2012, Etats-Unis) et besoins opérationnels associés	6
1.1.1. Gestion de crise et dommages directs subis par la ville de New-York	7
1.1.2. Synthèse des effets cascade entre secteurs d'importance vitale lors de Sandy	9
1.1.1 Synthèse du retour d'expérience de Sandy et intérêt du sujet de thèse	12
1.2 Organisation de la planification et de la gestion de crise en France	13
1.2.1 Réseaux techniques, et secteurs d'activités d'importance vitale	14
1.2.2 Acteurs de la planification et de la gestion de crise dans la sécurité civile en France	15
1.2.3 Dispositif ORSEC Retap'Reseaux	17
1.1.3. Les opérateurs de réseaux techniques, la planification et la gestion de crise	21
1.2.4 L'exercice crue centennale en Île-de-France : Sequana 2016	21
1.1.4. Conclusion sur la planification et la gestion de crise en France relatives aux défaillances de réseaux techniques	25
1.3 Positionnement de la thèse face aux besoins opérationnels	26
2 Etat de l'art	27
2.1 Définition des termes	27
2.1.1 Réseaux techniques et infrastructures	27
2.1.2 Qualification des structures des réseaux et identification des infrastructures	29
2.1.3 Différentes significations du terme « vulnérabilité »	34
2.1.4 Concepts de résilience	39
2.1.5 Dépendances, interdépendances et effets cascade	43
2.2 Outils existants pour modéliser les effets cascade entre réseaux techniques	44
2.2.1 Critères opérationnels de sélection des outils de modélisation	45
2.2.2 Description des outils de modélisation des effets cascade retenus dans l'approche implicite	48
2.2.3 Description des outils de modélisation des effets cascade retenus dans l'approche explicite	50

2.2.4	Conclusion sur les outils de modélisation des effets cascade retenus dans les approches explicites et implicites.....	58
2.3	Méthodes existantes d'évaluation de la vulnérabilité et la résilience des réseaux techniques.....	60
2.3.1	Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité.....	60
2.3.2	Méthodes d'évaluation de la résilience	66
2.4	Analyse des manques et premiers éléments de réflexion sur les orientations à retenir pour la méthodologie développée.....	72
2.4.1	Synthèse des manques constatés dans l'état de l'art	72
2.4.2	Choix de l'orientation sur les méthodes de modélisation des effets cascade pour la sécurité civile.....	73
2.4.3	Choix de l'orientation sur les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité et de la résilience par les opérateurs	75
2.5	Synthèse des questionnements et structure de la thèse.....	75
3	Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile	78
3.1	Classement des causes potentielles d'effets cascade.....	81
3.2	Approfondissement d'une cause d'effet cascade : agression accidentelle du linéaire des réseaux et coupure préventive pour une intervention en sécurité des sapeurs-pompiers sur feux de transport	84
3.2.1	Méthode d'identification des zones présentant un risque d'agression accidentelle du linéaire de réseaux et zones de risque métier	87
3.2.2	Avantages opérationnels, statistiques et conclusion sur les résultats de la méthode.....	91
3.3	Limites d'une modélisation d'effets cascade à l'échelle du service urbain par une base de données orientée graphe	94
3.3.1	Présentation de la base de données orientée graphe et des données sur les services urbains	95
3.3.2	Potentiel opérationnel de l'utilisation d'une base de données orientée graphe pour la compréhension du territoire.....	99
3.3.3	Limites de l'approche base de données orientée graphe à l'échelle du service urbain et nécessité de spatialiser les dépendances.....	106
3.4	Discussion sur la possibilité d'attribuer des zones d'impact fixes aux infrastructures de chaque réseau technique.....	107
3.4.1	Réseau électrique de distribution	107
3.4.2	Réseau d'eau potable.....	118
3.4.3	Réseau de distribution de gaz	122
3.4.4	Autres réseaux techniques	124
3.4.5	Limites opérationnelles d'une base de données orientée graphe à l'échelle de l'infrastructure pour la modélisation d'effets cascade.....	124

3.5	Démonstration de faisabilité d'un couplage faible entre simulateurs spécifiques pour la modélisation d'effets cascade.....	125
3.5.1	Méthode générale.....	126
3.5.2	Application à un scénario de coupure d'électricité sur un réseau de distribution d'eau fictif construit sur la base du réseau de Saint-Nazaire	127
3.5.3	Etude des facteurs d'influence sur les autonomies locales et comparaison des indicateurs d'autonomie généraux et locaux.....	134
3.5.4	Etude de faisabilité sur la généralisation de zones d'impact évolutives et perspectives d'interprétation du couplage faible par les zones d'impact évolutives.....	142
3.6	Méthode d'évaluation des conséquences sociétales immédiates et du seuil temporel d'évolution vers une crise dans le cas d'un effet cascade.....	145
3.6.1	Modélisation de l'évolution de la densité humaine.....	145
3.6.2	Discussion autour des résultats sur l'évolution de la densité humaine	149
3.7	Conclusion sur les apports pour l'étude et la modélisation des effets cascade.....	152
4	Vulnérabilité et résilience des réseaux techniques à destination des opérateurs....	155
4.1	La méthode d'évaluation de la vulnérabilité et de la résilience développée pour les réseaux d'eau.....	155
4.1.1	Concepts généraux	155
4.1.2	Illustration de la méthode	158
4.1.3	Analyse de la vulnérabilité sur le système d'illustration.....	160
4.1.4	Analyse de la résilience sur le système d'illustration	165
4.2	Cas d'application de la méthode précédente sur trois réseaux d'eau.....	177
4.2.1	Présentation des études de cas choisies par les opérateurs de réseaux d'eau potable 180	
4.2.2	Synthèse des commentaires formulés par les opérateurs lors de l'utilisation de la méthode et conclusion sur celle-ci.....	180
4.3	Discussion sur l'extension de la méthodologie précédente à d'autres réseaux	182
4.3.1	Discussion sur les critères de performance des réseaux.....	182
4.3.2	Discussion sur l'applicabilité de la méthode d'évaluation de la vulnérabilité et résilience, complémentarité de la méthode avec la modélisation des effets cascade par couplage faible.....	184
4.4	Conclusion du chapitre 4.....	186
5	Discussion générale et conclusion.....	190
6	Bibliographie.....	196
	Table des illustrations.....	208
	Liste des tables	211
	Annexe 1 : Présentation des projets qui encadrent ce travail de thèse	214
1.	Projet DEMOCRITE.....	214

2. Projet RESIWATER	215
3. Projets européens CIPRNet et PREDICT	216
Annexe 2 : Mise en situation de la problématique de thèse : l'exemple de l'ouragan Sandy (2012, Etats-Unis)	217
1. Gestion de crise et dommages directs subis par la ville de New-York.....	217
2. La perturbation des réseaux techniques pendant Sandy.....	218
2.1.1. Communication et réseaux de télécommunication:	218
2.1.2. Réseau électrique :	218
2.1.3. Approvisionnement en carburant de la ville.....	219
2.1.4. Réseau routier	221
2.1.5. Le réseau métropolitain	222
2.1.6. Le réseau d'eau	223
2.1.7. Les impacts directs de Sandy sur les besoins vitaux des victimes.....	224
Annexe 3 : Structures des réseaux électriques de transport et de distribution.....	226
Annexe 4 : Description des modèles géomatiques et de leurs limites pour la cartographie des risques présentant un risque métier liés aux réseaux techniques pour la BSPP.....	231
Annexe 5 : Description supplémentaire du réseau d'eau fictif utilisé dans le §3.5	237
Annexe 6 : Application de la méthode d'évaluation de la vulnérabilité et de la résilience au réseau fictif du §3.5	248
Annexe 7 : Lettre de recommandation de la Brigade de Sapeurs-Pompiers de Paris pour le travail accompli par A. Grangeat dans le cadre du projet DEMOCRITE	252
Annexe 8 : CIPRNet Young CRITIS Award 2016	254

Acronymes

Acronyme	Signification
ADS	Adjoint Défense Sécurité
BDOG	Base de Données Orientée Graphe
BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières
CEMZ	Chef d'Etat Major de Zone
CEREMA	Centre d'étude et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
CERTU	Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions
CETE	Centre d'études techniques de l'équipement
CETMEF	Centre d'études techniques maritimes et fluviales
CIC	Cellule Interministérielle de Crise
CMVOA	Centre Ministériel de Veille Opérationnelle et d'Alerte
DDT	Direction Départementale des Territoires
DDTM	Direction Départementale des Territoires et de la Mer
DEAL	Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
DGAC	Direction Générale de l'Aviation Civile
DGALN	Direction Générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature
DGEC	Direction Générale de l'Energie et du Climat
DGITM	Direction Générale des Infrastructures, du Transport et de la Mer
DGPR	Direction Générale de la Prévention des Risques
DGSCGC	Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion Des Crises
DIR	Direction Interdépartementales des Routes
DM	Direction de la Mer
DMZ	Délégué ministériel de Zone
DPSE	Direction de la Protection et de la Sécurité de l'État
DREAL	Direction Régionale de l'environnement, de l'Aménagement et du Logement
DRIEA	Direction Régionale et Interdépartementale de l'Equipement et de l'Aménagement
DRIEE	Direction Régionale et Interdépartementale de l'Environnement et de l'Energie
DRIHL	Direction Régionale et Interdépartementale de l'Hébergement et du Logement
DRIM	Direction interrégionales de la Mer pour la métropole
DSS	Decision Support System
DTAM	Direction des Territoires, de l'Alimentation et de la Mer
EC	Effet Cascade
HFDS	Hauts Fonctionnaires de Défense et de Sécurité
IFSTTAR	Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux
INERIS	Institut national de l'environnement industriel et des risques
IRSN	Institut de Recherche en Sûreté Nucléaire
MEDDE	Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie
MEEM	Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer
OIV	Opérateur d'Importance Vitale
ORSEC	Organisation de la Réponse de la Sécurité Civile
PCA	Plan de Continuité d'Activité
PIV	Point d'Importance Vitale
PSO	Plan de Sécurité d'Opérateur
PPP	Plan Particulier de Protection
SAIV	Secteur d'Activité d'Importance Vitale
SCHAPI	Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations
SDSIE	Service Défense, Sécurité, Intelligence Economique
SETRA	Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements
SC	Sécurité Civile
SG	Secrétariat Général
SGDSN	Secrétariat Général de la Défense et de la Sécurité Nationale
SGZDS	Secrétariat Général de la Zone de Défense et de Sécurité
SRNH	Service des Risques Naturels et Hydrauliques
SRT	Service des Risques Technologiques
STEEGBH	Service Technique de l'Energie Electrique, des Grands Barrages et de l'Hydraulique
UIC	Union Internationale des Chemins de Fer
ZDS	Zone de Défense et de Sécurité

Remerciements

Je souhaite remercier par ces quelques lignes l'ensemble des personnes qui m'ont aidée dans cette aventure, tant d'un point de vue professionnel que d'un point de vue personnel. D'un point de vue professionnel tout d'abord, je souhaite remercier le CEA Gramat et particulièrement Emmanuel Lapébie, pour son encadrement, son énergie débordante et les débats passionnés que le moindre désaccord pouvait engendrer. Merci également à Dominique Sérafin et Yohan Barbarin, qui m'ont permis de participer à deux projets européens riches en échanges scientifiques et multiculturels. Je souhaite également remercier les partenaires des quatre projets de recherche :

- et en premier lieu, merci à la Brigade de Sapeurs-Pompiers de Paris et la Zone de Défense et de Sécurité de Paris. Merci à ses membres pour leur accueil toujours chaleureux, pour leurs explications sur ce monde opérationnel, et particulièrement merci à Frederic Sepot, Stephane Raclot, Floriane Brill et Benjamin Fouilleul ;
- Merci également à Eric Lafontaine (DGA) et Jean De Floris (DGA) pour leurs apports méthodologiques précieux ;
- Merci à l'IRSTEA et en particulier à Olivier Piller, Denis Gilbert et leur équipe pour m'avoir fait découvrir le monde de la modélisation hydraulique, et merci aux gestionnaires de réseaux d'eau (Véolia Île-de-France, Strasbourg Eurométropole et Berlin Wasser Betriebe) pour nos débats sur la résilience et la vulnérabilité des réseaux d'eau potable ;
- Merci à l'ensemble des partenaires de recherche des projets européens CIPRNet et PREDICT. En particulier, je souhaite vivement remercier Marianthi Theocharidou (Joint Reserch Center, Ispra, Italie) et Vittorio Rosato (ENEA, Rome, Italie) pour leur accueil dans le cadre des échanges entre partenaires.
- Merci également à Benoît Robert (Centre Risque et Performance, Polytechnique Montréal, Canada) pour son aide sur ces sujets complexes.

Enfin, pour clore les remerciements professionnels, je souhaite remercier chaleureusement mon équipe d'encadrement à l'Institut des Sciences des Risques (Mines d'Alès), et dans l'ordre Gilles Dusserre pour la direction de cette thèse, Aurélia Bony Dandrieux et Jérôme Tixier pour leur encadrement.

Merci enfin, à tous ceux qui m'ont apporté l'énergie nécessaire pour pouvoir respecter ce planning ambitieux (2 projets ANR et 2 projets européens pour une thèse...). Je parle ici de mes amis, ma famille, mon compagnon et de mes collègues. Merci chaleureusement pour tous nos fous-rires.

Avant-propos

Le travail présenté dans cette thèse est le fruit de multiples interactions avec les différents acteurs de la gestion de crise, et ce à plusieurs niveaux : opérateurs de réseaux (dont les réseaux d'eau via RESIWATER, projet ANR Franco-Allemand), primo-intervenants (travail avec la Brigade de Sapeurs-Pompiers de Paris via l'ANR DEMOCRITE), membres de la sécurité civile, chercheurs en gestion de crise – français ou européens (via les projets européens PREDICT et CIPRNet). Tous ont contribué par leur partage d'expériences à enrichir cette thèse. Ils ont également imposé la nécessité d'obtenir des résultats opérationnels, exploitables par les acteurs concernés, en tant qu'aboutissements (livrables) de ces projets de recherche. La méthodologie de ce travail de thèse s'est ainsi construite autour des attentes opérationnelles formulées au travers des différents projets, présentés dans l'Annexe 1.

Introduction et organisation de la thèse

Le fonctionnement comme la rupture des réseaux techniques vitaux influencent la gestion de crise. Les réseaux de transport d'énergie (électricité, gaz, pétrole, vapeur), de télécommunications (filaire ou aérien), de transport de personnes ou encore les réseaux d'eau (réseau d'eau potable ou d'assainissement) sont des systèmes essentiels à l'activité de notre société. Ils assurent un service à de très nombreux enjeux du territoire et leur défaillance peut provoquer un fort impact.

En effet, ces réseaux étendus géographiquement sont interdépendants. Les infrastructures d'un réseau, dispersées sur un territoire, sont dépendantes du fonctionnement de réseaux support. Mais elles sont également productrices de services pour d'autres infrastructures appartenant à d'autres réseaux, avec parfois des boucles de rétroaction. Cette complexité amplifie le pouvoir d'impact de la défaillance des réseaux. Une interruption de service d'un premier réseau dans une première zone peut se traduire par la perturbation de service d'un deuxième réseau dans une seconde zone. On appelle cela un effet cascade. L'ouragan Sandy (Etats-Unis) en 2012 –comme de nombreux autres événements (blackout d'août 2003 aux Etats-Unis, crise nucléaire de Fukushima Daïchi en 2011) – a clairement mis en évidence la nécessité de tenir compte de ces effets indirects en gestion de crise. Ces catastrophes illustrent l'intérêt opérationnel pour l'étude des effets cascade, dans une optique d'amélioration de la planification et d'aide à la décision en gestion de crise.

Prenons un exemple d'effet cascade observé lors de l'exercice Sequana (simulation de la crue centennale en Île-de-France, 2016) : les coupures d'électricité (simulées), très localisées autour des zones inondées, ont causé malgré tout l'interruption électrique d'une usine de traitement des eaux non touchée par l'inondation, usine qui dessert en fonctionnement normal une zone étendue bien au-delà de l'espace privé d'électricité [Grangeat, Eaux, Observation Sequana, 2016]. Cet exemple met en évidence plusieurs besoins : en premier lieu la connaissance des effets cascade permet aux opérateurs de mieux se préparer à une crise, et à la sécurité civile d'anticiper les dégradations potentielles d'une situation. Dans un deuxième temps, cet exemple montre que l'étude des effets cascade pour la gestion de crise doit être une étude spatialisée, avec des liens de dépendance à l'échelle de l'infrastructure. En plus des effets cascade inter-réseaux, l'interruption d'une infrastructure peut causer des perturbations en interne à l'ensemble du réseau : il faut donc considérer également une modélisation systémique de chaque réseau. Enfin, la transmission d'une défaillance d'un réseau à un autre n'est pas automatique. Cette propagation est facilitée par la vulnérabilité de chaque infrastructure et ralentie par la résilience de chaque système. Dans un troisième temps consacré à cet exemple, l'usine peut compenser partiellement le manque d'électricité par une solution alternative (mise en place d'un groupe électrogène), si toutefois elle en a les capacités immédiates (préparation, anticipation, procédures) et une capacité à moyen terme de maintien de cette solution (réalimentation en hydrocarbures par exemple). Le réseau d'eau peut également être reconfiguré afin de compenser intégralement la défaillance de production d'une usine (résilience du système). Opérateur par opérateur, la compréhension de la

vulnérabilité de chacune de leurs infrastructures et de la résilience de leur système permet de mieux décider en gestion de crise, et de bien identifier – en dehors d’une crise – les axes d’amélioration des réponses planifiées. Le regroupement de cette connaissance offre, en perspectives à la sécurité civile, une vue d’ensemble des capacités de gestion de crise de chaque réseau, scénario par scénario. Cet exemple illustre bien l’ensemble des aspects de la problématique de thèse, et justifie le titre choisi : « 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 ».

Objectifs et démarche méthodologique (structure du mémoire)

Le double questionnement de ce travail de thèse se positionne vis-à-vis des besoins opérationnels : comment modéliser les effets cascade entre réseaux techniques pour mieux planifier et gérer une crise du point de vue de la coordination – la sécurité civile – et du point de vue des opérateurs de réseaux ? Comment mesurer les vulnérabilités et les résiliences des réseaux techniques face aux différents scénarios, en prenant en compte ces effets cascade ? Ce travail va utiliser pour cela une modélisation spatiale et systémique des différents réseaux. Les étapes méthodologiques – qui correspondent à la structure du mémoire - sont présentées ci-dessous. Elles sont résumées sur la Figure 1.

Les effets cascade entre réseaux techniques sont des événements exceptionnels et il n’y en a pas eu de majeurs ces dix dernières années en France concernant les réseaux techniques qui ont été documentés et publiés. L’introduction expose en premier lieu les effets cascade observés à l’étranger lors de l’ouragan Sandy (2012, Etats-Unis), et la nécessité formulée par la sécurité civile américaine de tenir compte de ces effets en gestion de crise. La situation française est ensuite expliquée à travers les acteurs concernés par la gestion de crise, les plans de réponse de la sécurité civile mais également les obligations réglementaires et ministères de tutelles de ces réseaux qui sont des infrastructures vitales. L’exercice inondation Sequana (2016, France), qui simulait la crue centennale en Île-de-France sur deux semaines, a très bien mis en évidence l’importance de tenir compte de la vulnérabilité et de la résilience de chacun, afin de ne pas subir ces effets cascade. L’organisation de l’exercice, ses enjeux et participants sont également décrits dans ce premier chapitre. Les retours des participants ont permis d’identifier les contraintes de temps et d’échanges de données lors de la planification ou de la gestion de crise. Celles-ci vont conditionner la sélection des méthodes analysées dans l’état de l’art. Il en résulte les questionnements opérationnels précédemment cités.

Le deuxième chapitre s’intéresse aux approches existantes dans la littérature pour répondre à ce questionnement. Il commence par définir les termes système, réseau technique, vulnérabilité, résilience, interdépendance et effet cascade. En effet, utilisées dans différents secteurs ou contextes, ces notions sont éminemment polysémiques. Il s’agit dans un premier temps de proposer et de justifier les définitions retenues dans cette thèse. La deuxième partie s’intéresse aux méthodes existantes de modélisation d’effets cascade, avec deux critères majeurs de sélection : modéliser au moins deux réseaux techniques, et avoir été déjà appliquée à un territoire de la taille *a minima* d’une ville. Ce dernier critère améliore la crédibilité des outils proposés, afin de distinguer les différents projets de recherche. Une troisième partie est

consacrée aux différentes méthodes d'évaluation de la vulnérabilité et de la résilience existantes - très souvent associées à un contexte particulier d'utilisation. En conclusion de ces états de l'art, une synthèse identifie les avantages des différentes méthodes, et les manques vis-à-vis des contraintes opérationnelles et du contexte français. Il fait ainsi le lien entre un questionnement opérationnel et un questionnement scientifique, et justifie l'orientation du travail dans les chapitres suivants.

Le troisième chapitre s'intéresse à la modélisation des effets cascade à destination de la sécurité civile. Dans ce chapitre seulement, nous ferons l'hypothèse que les réseaux sont des systèmes simplement techniques, et nous nous focaliserons sur la propagation rapide (quelques heures) de défaillances via des liens de dépendances géographiques, physiques et cybernétiques. La prise en compte du système sociotechnique viendra dans un second temps, dans le chapitre 4.

Après avoir classé différentes causes potentielles d'effets cascade, la deuxième partie approfondit une cause nouvellement identifiée d'interruption de réseaux techniques : l'intervention sur feu des sapeurs-pompiers à proximité de réseaux techniques dangereux nécessite dans certaines zones de demander la coupure du réseau pour la sécuriser. Ce travail propose une méthode pour cartographier automatiquement ces zones, qui présentent tout autant des risques métiers – intérêt opérationnel formulé par la Brigade de Sapeurs-Pompiers de Paris dans le cadre de DEMOCRITE – qu'un potentiel de causes d'effets cascade lorsque ces interruptions sont combinées en simultané. Le travail réalisé illustre la nécessité d'analyser cause par cause les facteurs propices aux effets cascade. Afin de généraliser l'approche de ce travail, le reste du chapitre 3 considérera la défaillance d'une ou plusieurs infrastructures comme l'évènement initiateur d'un effet cascade, sans s'intéresser à la cause de ces défaillances.

La troisième partie du chapitre 3 teste la faisabilité d'une modélisation des effets cascade entre services urbains à l'aide d'une base de données orientée graphe, sans descendre à l'échelle de l'infrastructure, et donc dans une approche non spatialisée. Ces résultats permettent d'avoir une vue d'ensemble de la complexité de la situation. Cependant ils prouvent la nécessité de descendre à l'échelle de l'infrastructure avec des liens de dépendance spatialisés, pour obtenir des résultats d'effets cascade assez précis pour être exploitables par la sécurité civile et les opérateurs.

La quatrième partie explore l'intérêt opérationnel d'une base de données orientée graphe qui serait à l'échelle de l'infrastructure. En effet, celle-ci présente un intérêt de modélisation des effets cascade pour la sécurité civile seulement si l'on est capable d'attribuer à chaque infrastructure défaillante une zone d'impact fixe. Cette zone sert à estimer les conséquences et donc à hiérarchiser les scénarios par gravité et à dimensionner les ressources pour y répondre. La quatrième partie teste alors la faisabilité d'attribution d'une zone d'impact fixe à plusieurs infrastructures de façon indépendante, sur plusieurs réseaux. Mais peu d'infrastructures sont compatibles avec cette approche, ce qui limite fortement l'intérêt d'une base de données orientée graphe à l'échelle de l'infrastructure pour la modélisation des effets cascade. Obtenir

une zone d'impact nécessite souvent de considérer l'ensemble des infrastructures d'un réseau, et de modéliser la réorganisation de celui-ci via des simulateurs spécifiques.

La cinquième partie explore donc une autre possibilité pour modéliser les effets cascade : le couplage faible entre deux simulateurs de réseau technique, et l'utilisation du calcul de ces zones d'impact par réseau comme lien de couplage. En effet, si l'état de l'art a mis en évidence l'existence de couplages de simulateurs spécifiques, aucune démarche explicite n'utilise jusqu'alors des zones d'impact comme liens. De plus les couplages existants sont des couplages forts, ce qui pose des problèmes opérationnels d'acquisition de données et d'entretien d'une expertise de simulation au sein de la sécurité civile. Ce travail propose donc une méthode originale de couplage faible pour modéliser les effets cascade. Elle permet d'obtenir ces zones d'impact nécessaires à la sécurité civile, en s'appuyant sur les capacités de simulation interne des opérateurs et en respectant les contraintes opérationnelles. La faisabilité de cette approche est démontrée sur le scénario de coupure d'électricité sur un territoire étendu autour de Saint-Nazaire, et les conséquences de celle-ci sur le fonctionnement du réseau d'eau potable. Ce territoire a été choisi suite à la coupure d'électricité réelle observée en 2016.

Enfin, le dernier point du chapitre 3 s'intéresse à la modélisation des conséquences de ces ruptures de service par effet cascade sur la société. La mobilité quotidienne de la population, en termes de cartographie de densité, n'est actuellement pas intégrée dans les outils existants de planification et de gestion de crise. La méthode développée pour cette cartographie permet d'améliorer l'estimation du nombre de personnes touchées par les zones d'impact précédemment calculées, et donc de classer les scénarios d'effets cascade par gravité. Cette méthode a été appliquée sur un quartier de la région Île-de-France dans le cadre de DEMOCRITE. Les différents points du chapitre 3 couvrent ainsi la question des effets cascade depuis l'analyse des causes jusqu'à celle des conséquences, en passant par plusieurs tests de modélisation.

Dans le chapitre 4, nous considérons à nouveau les réseaux techniques comme des systèmes sociotechniques. En effet, la propagation d'un effet cascade est facilitée par la vulnérabilité de chaque infrastructure et ralentie par la résilience de chaque système – notion liée à la réaction, pour partie organisationnelle, du système. Ce chapitre propose une méthode d'évaluation de ces deux concepts. Elle a pour but de fournir à la fois, à la sécurité civile, la vue d'ensemble des capacités de gestion de crise de chacun, et aux opérateurs, l'identification par scénario de leurs axes d'amélioration (synthèse des points faibles et points forts) sur leurs capacités de résilience. La démarche proposée est innovante de par les trois objectifs suivants. Elle doit alors être transposable à différents scénarios et différents réseaux techniques, et doit tenir compte des effets cascade tels qu'ils ont été simulés dans le précédent chapitre. Elle doit également respecter le constat simple que ce sont les opérateurs qui ont la maîtrise de leur réseau. C'est donc à eux de s'approprier la méthode développée et de l'appliquer aux scénarios qui les concernent. La première partie détaille et illustre cette méthode. Puis la deuxième partie explique la mise en application de celle-ci par trois opérateurs de réseaux d'eau sur neuf scénarios différents dans le cadre du projet RESIWATER. Enfin une troisième

partie discute de l'extension de cette méthode à d'autres réseaux techniques et de la qualité du résultat attendu. Elle met en perspective les résultats obtenus avec l'amélioration du couplage faible de simulateurs proposé dans le chapitre 3.

La conclusion synthétise les questionnements soulevés pendant ce travail, les réponses apportées par les méthodologies développées, et met en perspective le travail réalisé avec des pistes de développement qui amélioreraient la connaissance de ces trois notions liées à la planification et à la gestion de crise : vulnérabilité, résilience et effets cascade entre réseaux techniques.

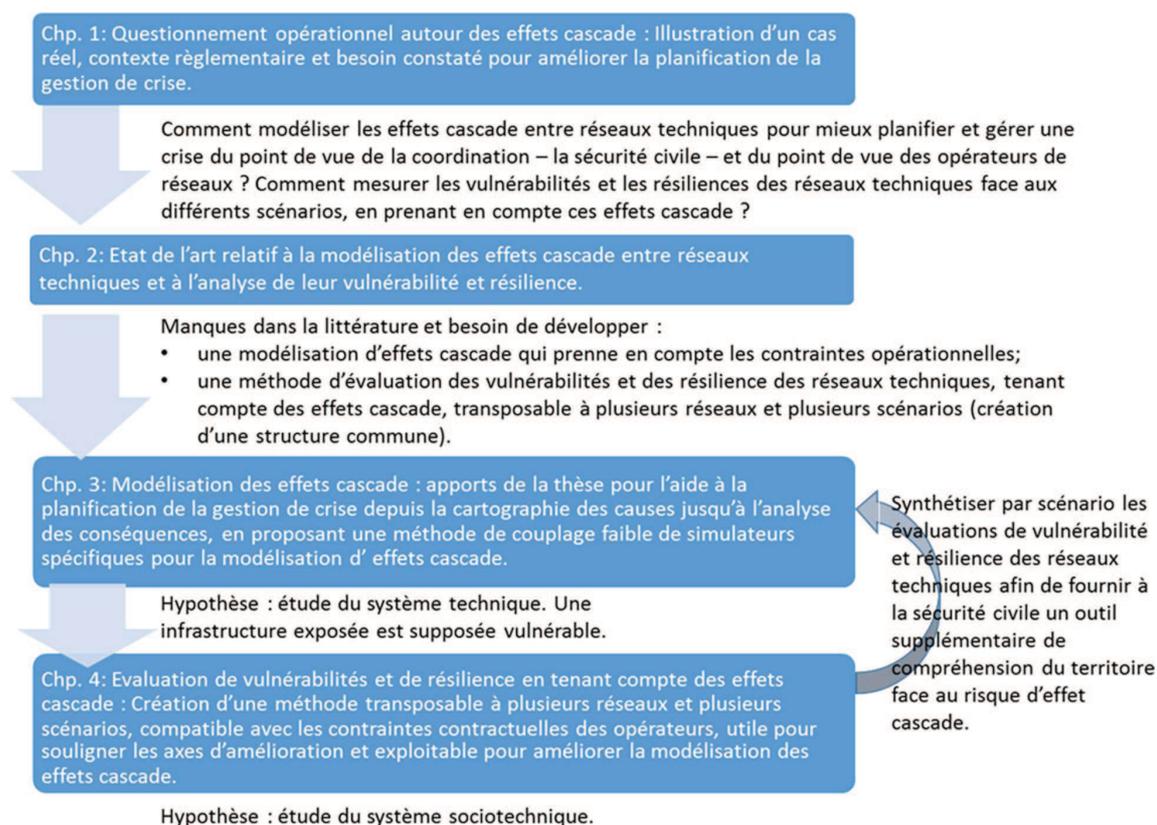


Figure 1 : Organisation de la thèse

1 Etude des effets cascade entre réseaux d'infrastructures et de leurs impacts sur la gestion de crise

Ce chapitre illustre l'intérêt opérationnel des institutions de sécurité civile pour l'étude des effets cascade entre réseaux techniques. La première section montre, sur la base de l'analyse de la crise réelle de l'ouragan Sandy en 2012, la distinction entre les impacts directs et les perturbations de la société liées aux défaillances en chaîne des réseaux techniques. Les retours d'expérience officiels réalisés par les institutions américaines soulignent la nécessité de mieux comprendre ces effets et de les anticiper dans la mesure du possible. La deuxième section transpose cette problématique au territoire français, en décrivant les acteurs engagés dans la réglementation, la planification, et la gestion de crise en cas d'effet cascade. Elle introduit notamment le dispositif ORSEC (Organisation de la Réponse de la Sécurité Civile) dédié à ces situations de défaillances de réseaux techniques vitaux à la société, dénommé RétaP'réseaux. Celui-ci met lui aussi en évidence le besoin d'étudier les interdépendances, tout en distinguant les responsabilités de chacun : l'Etat vient en complément de la gestion de crise d'un opérateur de réseau technique, quand les capacités de ce dernier sont dépassées. Nous avons donc deux acteurs distincts et des besoins différents d'indicateurs d'aide à la décision entre la sécurité civile et les opérateurs, autour de la problématique commune des effets cascade. Enfin, cette section traduit ce besoin identifié par la réglementation en un besoin constaté lors de l'exercice Sequana relatif à la crue centennale en Île-de-France, réalisé en mars 2016. Le scénario de l'exercice proposait à la fois la carte des zones inondées, des zones privées d'électricité et des zones sans accès aux télécommunications traditionnelles. Certains opérateurs de réseaux techniques ont dû alors adapter leurs réactions à ces difficultés supplémentaires engendrées par les défaillances des réseaux. Cet exercice souligne le besoin d'anticiper ces zones de défaillance de service par effet cascade dans la planification des opérateurs de réseaux techniques. Enfin la quatrième section résume le questionnement opérationnel déduit des précédentes observations.

1.1 Analyse des effets cascade lors de l'ouragan Sandy (2012, Etats-Unis) et besoins opérationnels associés

Les catastrophes majeures qui se déroulent dans nos sociétés modernes mettent bien souvent à jour l'extrême complexité de nos systèmes : chaque service repose sur le fonctionnement d'une multitude d'infrastructures hétérogènes, et la défaillance de l'une peut faire tomber le système entier par effet cascade. L'ouragan Sandy du 29 octobre 2012 a été estimé comme le deuxième ouragan le plus destructeur des Etats-Unis en termes de pertes économiques, derrière l'ouragan Katrina [Haraguchi, 2014]. L'étude de Sandy met en évidence la difficulté et le besoin de comprendre les impacts indirects lors d'une catastrophe majeure. Le retour d'expérience suivant prend en compte les impacts liés aux dysfonctionnements des réseaux, et par là même les besoins potentiels d'anticipation de ces défaillances. Il illustre également la difficulté de prendre des décisions lorsque les données sur l'état des réseaux techniques ne sont pas disponibles immédiatement.

Chapitre 1 : Etude des effets cascade entre réseaux d'infrastructures et de leurs impacts sur la gestion de crise

1.1.1. Gestion de crise et dommages directs subis par la ville de New-York

Les paragraphes ci-dessous synthétisent les chiffres-clés relatifs à l'ampleur de la catastrophe, aux victimes, et à la défaillance des réseaux techniques. L'Annexe 1 décrit précisément les impacts directs et indirects et le déroulé des événements. Elle correspond à une analyse du document réalisé par la Mairie de New-York « Sandy after Action » en 2012 qui décrit l'ensemble des mesures prises et les recommandations pour améliorer la gestion de crise. [Gibbs, 2013]. L'intérêt de prendre en compte les effets cascade entre réseaux techniques et d'utiliser un SIG (Système d'Information Géographique) y est mis en valeur.

La ville de New-York a été particulièrement touchée par Sandy. Le niveau d'eau atteint lors de Sandy était à 4,3 m alors que l'inondation centennale avait été calculée pour 3,7 m. La **Figure 2** représente les zones inondées. L'emblématique Manhattan a subi de sévères coupures d'électricité, les ponts et tunnels la reliant au reste de la ville ont été endommagés. Environ 375 000 New-Yorkais, 6 hôpitaux, un hôpital psychiatrique, 22 nurseries et 18 établissements de santé pour adultes ont été évacués.

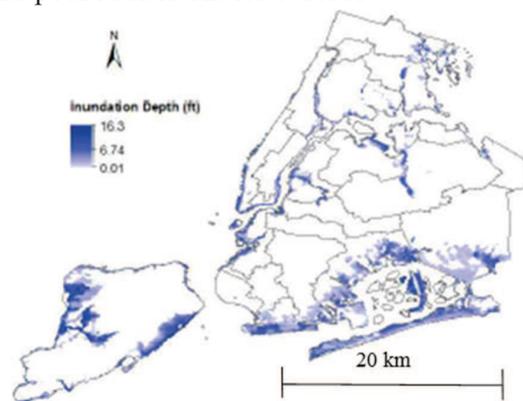


Figure 2: Cartes des zones inondées par Sandy sur New-York [Haraguchi, 2014]

Du côté des réseaux techniques, un hub a été inondé ; les tours de télécommunications qui fonctionnent sur du courant commercial et ne sont pas obligées d'avoir un générateur de secours sont tombées perturbant le réseau filaire, mobile et internet pendant plusieurs jours [Gibbs, 2013]. La ville a déployé des antennes mobiles sur camion. Malgré la surcharge des réseaux de télécommunication, il n'y a pas eu d'interruption du 311 et du 911 (numéros de secours) (voir Annexe 1 pour plus de détails).

L'inondation d'un poste source ainsi que de quatre postes du LIPA (Long Island Power Authority) ont interrompu le courant, laissant environ 1,5 million de personnes sans électricité [Gibbs, 2013]. Puis les arbres tombés ont coupé le courant à 70 % des clients résidant dans le Bronx, Brooklyn, Queens et les Staten Island. Le noir était également total dans les Rockaways, Coney Island et les environs côtiers. Les zones privées d'électricité ont été bien plus étendues que les zones inondées. La ville a placé 230 générateurs de secours pour répondre aux besoins vitaux [Gibbs, 2013]. Une des recommandations issues du retour

Chapitre 1 : Etude des effets cascade entre réseaux d'infrastructures et de leurs impacts sur la gestion de crise

d'expérience de Sandy réalisé par la mairie correspond au développement d'une évaluation des différents besoins en électricité sur son territoire et de standards sur la restauration de services essentiels en cas de panne de courant. Comme le montre la **Figure 3** la remise en état du réseau électrique est un processus étalé dans le temps et dans l'espace.

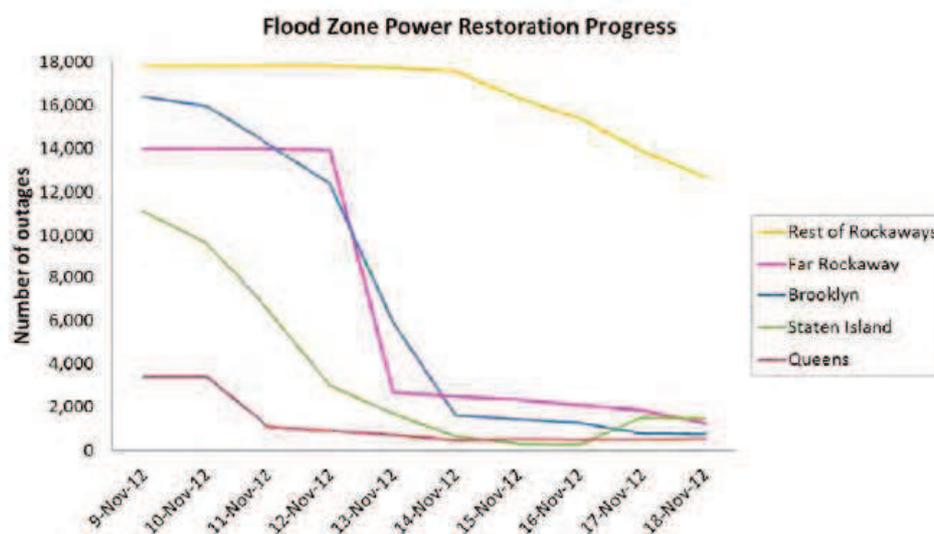


Figure 3 : Diagramme de restauration du service électrique dans la ville de New-York [Gibbs, 2013]

Environ 8 jours après Sandy, deux raffineries étaient encore arrêtées entraînant une perte de 26 % de la capacité totale de production journalière de barils de fioul de la région [Haraguchi, 2014]. La majorité des stations-essence n'ont pas été impactées par l'ouragan ou par les coupures d'électricité, mais par l'arrêt de cette chaîne d'approvisionnement. Un rationnement a été mis en place pour les particuliers [Gibbs, 2013].

Six tunnels routiers ont été mis hors service et Manhattan était devenue difficile d'accès (voir annexe). Les feux de trafic étaient également hors service. Par ailleurs le FDNY (Fire Department of New-York) a nettoyé 700 000 tonnes de débris parmi lesquelles se trouvaient 100 000 véhicules qu'il a fallu évacuer [Gibbs, 2013].

Le réseau métropolitain a été extrêmement impacté par Sandy, mais de nombreux dégâts ont été évités. En effet, avant l'ouragan, le réseau a été fermé, les trains et les équipements ont été mis en hauteur et des sacs de sable ont été déposés autour des équipements sensibles. En tout, 8,6 millions d'usagers quotidiens du métro ont été impactés, les délais de retour en service allant de 6 jours à 7 mois (voir le détail en Annexe 1).

Environ 1 million de bouteilles d'eau ont été distribuées. Immédiatement après Sandy, certains résidents de bâtiments de grande hauteur n'avaient plus accès à l'eau courante. La

Chapitre 1 : Etude des effets cascade entre réseaux d'infrastructures et de leurs impacts sur la gestion de crise

mairie a mis en place des bouilleurs pour avoir accès à de l'eau chaude dans certains bâtiments occupés [Gibbs, 2013].

Les chiffres suivants ne peuvent pas être directement reliés à la présence de coupures de réseaux techniques, mais ils illustrent l'ampleur humaine de la catastrophe Sandy. Environ 6 300 patients ont été évacués des établissements médicaux. Le retour d'expérience a souligné le manque d'une procédure de retour vers les bâtiments une fois l'ouragan passé, comme par exemple une lettre qui confirmerait que les services essentiels sont bien à nouveau disponibles pour reprendre les activités médicales [Gibbs, 2013]. L'Annexe 1 illustre les établissements impactés, en distinguant ceux inondés de ceux non inondés. Il est clair qu'une analyse restreinte aux seules zones inondées aurait sous-estimé l'ampleur des dégâts. Les 73 sites d'hébergement pour les victimes ont abrité 6 800 évacués ; 9 centres de restauration ont été ouverts et ont servi 10 000 clients dans les premiers 16 jours. Environ 43 000 repas et 11 000 couvertures ont été distribués aux résidents restés chez eux. La ville a ouvert 17 points de distributions pour fournir 2,5 millions de repas.

1.1.2. Synthèse des effets cascade entre secteurs d'importance vitale lors de Sandy

Les pannes de courant et la perturbation des transports ont fortement impacté le fonctionnement de nombreuses industries directement ou indirectement à travers leur chaîne d'approvisionnement. Les paragraphes suivants décrivent les effets cascade à l'échelle macroscopique et de manière qualitative, puis de façon microscopique à l'échelle de l'infrastructure.

1.1.2.1. Analyse des impacts indirects de Sandy à l'échelle macroscopique

Il existe différentes études qui décrivent de façon quantitative les liens entre secteurs d'industrie à l'échelle « macro ». Elles se basent notamment sur les échanges économiques et la vulnérabilité des approvisionnements entre secteurs [Kunz, 2013]. Cette dernière partie s'intéressant à des domaines économiques/investissements plus qu'au temps court d'une crise de sécurité civile, elle ne sera pas détaillée par la suite.

Le rapport de l'UNISDR [Haraguchi, 2014] résume qualitativement les effets cascade. La panne de courant est citée dans presque tous les domaines comme une cause d'effets indirects (Table 1). Cette analyse globale gagne à être approfondie pour comprendre les liens locaux entre infrastructures, comme le montre le paragraphe suivant.

Table 1 : Description macroscopique des effets cascade de Sandy [Haraguchi, 2014]

Secteur	Dommages directs constatés	Dommages indirects constatés par secteur
Bâtiments	Dommages matériels	Perte d'équipements, difficulté d'accès à cause des transports perturbés, de l'arrêt des réseaux eau, assainissement ou collecte des déchets
Nourriture	Dommages matériels sur des bâtiments	Arrêt de l'activité à cause des coupures électriques, du manque d'accès à l'eau et aux moyens de transports
Hydrocarbures	Dommages matériels sur les raffineries, les canalisations et les stations essence	Arrêt de l'activité à cause des coupures électriques, du manque d'accès à l'eau, à l'assainissement et aux moyens de transports, plus des problèmes d'autorisation de fonctionnement
Santé	Dommages matériels sur des bâtiments	Arrêt de l'activité à cause des coupures électriques, du manque d'accès à l'eau, à l'assainissement et aux moyens de transports
Télécommunications	Dommages matériels sur des installations	Arrêt de l'activité à cause des coupures électriques
Transports	Dommages matériels sur les tunnels, les réseaux enterrés de transport et fermeture des ponts	Difficulté d'accès aux hydrocarbures et arrêts des opérations à cause de la coupure d'électricité
Réseau électrique	Dommages matériels sur des postes de distribution et sur les réseaux de distribution et de transport d'électricité	Fermetures préventives, manque d'approvisionnement par le New-Jersey, problèmes d'ajustement à cause des surtensions
Eau et Assainissement	Dommages matériels sur des installations	Arrêt de l'activité à cause des coupures électriques
Collecte des déchets	Dommages matériels sur des installations et sur les camions	Arrêt de l'activité à cause des coupures électriques

1.1.2.2. Analyse à l'échelle de l'infrastructure des dommages indirects selon Haraguchi

Haraguchi [Haraguchi, 2014] s'intéresse aux effets cascade d'un point de vue géographique avec la notion de zones d'impacts directs et indirects. Si l'on prend l'exemple du réseau électrique ; le poste électrique inondé (impact direct de l'inondation) va être associé à une zone d'impact, qui correspond à la zone non desservie en électricité suite à cette défaillance (impact indirect de l'inondation). Pour les autres secteurs d'activités, les infrastructures sont impactées directement par Sandy si elles se situent dans la zone inondée. Elles sont affectées indirectement par la défaillance du réseau électrique si elles se situent dans la zone sans électricité.

La Figure 4 illustre cette technique d'intersection géographique. Sur la base des données géographiques collectées (zone sans électricité d'après la mairie de New-York et zones inondées/bâtiments détruits d'après la *Federal Emergency Management Agency*), Haraguchi

identifie les infrastructures routières et les instituts médicaux impactés indirectement par la panne électrique (méthode schématisée) sur la **Figure 4**. Les résultats de cette méthodologie sont reportés dans la Table 2.

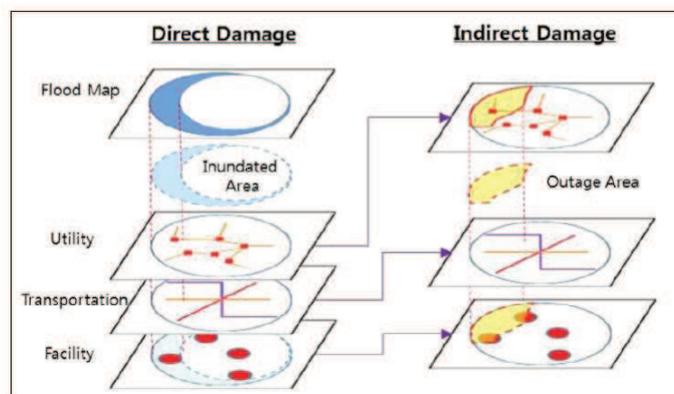


Figure 4 : Croisement des données géographiques pour obtenir les zones de dommages indirects [Haraguchi, 2014]

Table 2 : Comparaison des dommages directs et indirects [Haraguchi, 2014]

Secteur		Unité de mesure sur la ville de New-York (NY)	Dommages directs liés à l'inondation (9,9 % de la surface de NY)	Dommages indirects dus uniquement aux pannes électriques (cela concerne 2,8 % de la surface de NY)
Transports	Pourcentage du linéaire de transport impacté		10,7 %	19,4 %
Infrastructures médicales (IM)	Pourcentage du nombre d'infrastructures impactées directement et indirectement sur l'ensemble des IM de NY		7,5 %	2,4 %
Bâtiments détériorés	Pourcentage du nombre de bâtiments impactés sur le nombre total de bâtiment de New-York		7,0 %	16,8 %

Cependant, les résultats précédents ne sont pas comparables avec les observations de la mairie car, soit celle-ci utilise des unités de mesure différentes, soit les résultats sont trop vagues pour être intéressants à reproduire. En effet la surface ou le linéaire ne correspond pas avec le degré de perturbation d'un service, et le nombre d'infrastructures (médicales ou bâtis) ne correspond pas forcément au nombre de lits ou de personnes à évacuer. De plus la seule dépendance prise en compte ici correspond aux perturbations électriques en mettant de côté les autres aspects de la crise Sandy. Enfin le croisement des données géographiques à un instant t ne permet pas de saisir la dynamique de la crise.

Chapitre 1 : Etude des effets cascade entre réseaux d'infrastructures et de leurs impacts sur la gestion de crise

1.1.1 Synthèse du retour d'expérience de Sandy et intérêt du sujet de thèse

“Hurricane Sandy affected New Yorkers’ ability to live and work in the City’s building stock in two ways: through immediate damage from storm surge and wind and through power outages from damage to electricity, liquid fuels, and water networks.” [Gibbs, 2013]

Sandy illustre parfaitement la complexité d’anticiper les effets cascade entre réseaux techniques lors d’une catastrophe majeure. La gestion de crise et les plans que les responsables souhaitent appliquer se heurtent à une réalité terrain plus complexe à cause de la défaillance de plusieurs réseaux techniques. Sandy –au même titre que d’autres catastrophes dans des sociétés hyper-connectées– prouve que la défaillance des réseaux techniques peut amplifier les impacts d’une crise.

Le retour d’expérience de la mairie de New-York a identifié quelques pistes d’amélioration de sa gestion de crise qui soulignent l’importance de connaître son terrain d’intervention et ses dépendances. Deux catégories de recommandations concernent notamment le sujet de thèse [Gibbs, 2013].

1. Amélioration de la connaissance des réseaux et de la mise en place de ressources alternatives en fonction des besoins de la population dans le cas d’une situation analogue à Sandy.
 - a. Restauration de l’électricité: La mairie souligne l’utilité de connaître les besoins des bâtiments publics et privés dans les zones de basse altitude lors d’une éventuelle coupure d’électricité. Elle a exprimé l’utilité de développer une méthodologie d’évaluation des besoins en électricité ainsi que des méthodes pour arriver aux standards désirés de service essentiel.
 - b. Nécessité de pré-identifier les lieux où placer des générateurs de secours et des bouilleurs.
 - c. Travail avec les opérateurs des télécommunications pour avoir une meilleure vision de « Qui a accès à quel média et dans quelle zone ? ». La mairie souhaite développer un plan de pré-positionnement des COWs (Cells on Wheels) après une tempête de type Sandy, et mettre en place des standards minimum de capacité de textos et d’appels dans un cas analogue. La mairie souhaite également une amélioration du temps de résistance (batteries) des sites d’antennes situés dans des zones susceptibles d’être inondées.
2. Amélioration de la collecte de données (volonté de temps réel ou d’actualisation régulière) et de leur analyse à la ville de New-York.

La capacité à collecter des données actualisées a été particulièrement importante pour hiérarchiser les besoins vitaux. Or la connaissance à l’échelle du bâtiment des ruptures de services essentiels (électricité, télécommunication, accès au carburant, au gaz) a pris plusieurs jours, puis il a fallu croiser les données des opérateurs avec les données démographiques de la ville. Le département d’analyse des données de la ville de New-York devra développer un plan pour pouvoir collecter de façon régulière l’état des réseaux essentiels de la ville dont l’électricité, le carburant et les télécommunications et permettre de mieux gérer la distribution des services de secours. Ce département devra disposer de données actualisées à l’échelle du bâtiment pour améliorer la gestion

Chapitre 1 : Etude des effets cascade entre réseaux d'infrastructures et de leurs impacts sur la gestion de crise

de crise. La mairie a exprimé ce besoin suite aux quelques jours juste après Sandy où les opérateurs n'avaient pas pu encore lui fournir de données. Elles permettraient également de faciliter le retour à la normale et la réouverture des bâtiments évacués. Ces points soulignent l'intérêt opérationnel d'étudier les effets cascade et les conséquences entre réseaux techniques.

L'analyse des effets cascade *a posteriori* réalisée par [Haraguchi, 2014] illustre par ailleurs les difficultés d'analyse suivantes, alors que Sandy est un évènement très bien documenté :

1. la difficulté d'identifier des indicateurs d'impacts pertinents et mesurables sur la base des données existantes,
2. la difficulté de modélisation d'un phénomène complexe, même en ayant accès à une base de données importante sur un fait passé et bien documenté.

La coordination multi-acteurs d'une catastrophe majeure passe par une visibilité du terrain et donc par un accès aux données sur les services essentiels défaillants. Les recommandations de la mairie de New-York suite à Sandy soulignent l'importance d'obtenir ces données de façon précise (échelle du bâtiment) pour que les responsables puissent évaluer et quantifier la réponse opérationnelle. A l'inverse, ce n'est pas au directeur des opérations de secours de prendre en main la gestion de chaque réseau technique : il faut trouver le juste équilibre entre une coordination globale qui nécessite de comprendre les liens et besoins de chaque infrastructure, et une gestion de crise qui repose uniquement sur des retours des opérateurs pas toujours capables (par exemple : rupture des télécommunications) de fournir en temps voulu les informations demandées.

La transposition du retour d'expérience de Sandy au territoire français nécessite de comprendre dans un premier temps les différents acteurs de la réglementation, de la planification et de la gestion de crise. Les obligations de communication de données ne sont pas les mêmes qu'à New-York, les relations non plus, et le paragraphe suivant décrit la multiplicité des acteurs sur le sol français et identifie ceux concernés par la thèse. L'exercice Sequana, qui simule la crue centennale en Île de France, permettra de faire le lien entre le réseau d'acteurs en planification et gestion de crise en France et la mise en situation de ceux-ci face à une crise inondation incluant des effets cascade.

1.2 Organisation de la planification et de la gestion de crise en France

Les réseaux techniques tels que l'électricité, les télécommunications, les réseaux d'eau, de gaz, de carburant, ainsi que les réseaux routiers et ferroviaires appartiennent à ce que l'on appelle des Secteurs d'Activité d'Importance Vitale (SAIV). A chaque réseau est alors associé un ministère de tutelle et des obligations réglementaires (Table 2).

**Table 3 : Ministres coordonnateurs par secteur d'activité d'importance vitale
[JO 2006, JO 2008]**

Domaines	Secteurs	Ministres coordonnateurs
Etatiques	Activités civiles de l'Etat	Ministre de l'intérieur
	Activités militaires de l'Etat	Ministre de la défense
	Activités judiciaires	Ministre de la justice
	Espace et recherche	Ministre chargé de la recherche
Protection des citoyens	Santé	Ministre chargé de la santé
	Gestion de l'eau	Ministre chargé de l'écologie
	Alimentation	Ministre chargé de l'agriculture
Vie économique et sociale de la nation	Energie	Ministre chargé de l'énergie
	Communications électroniques, audiovisuel et information	Ministre chargé des communications électroniques (Ministère de l'Economie, de l'Industrie et du Numérique en 2016)
	Transports	Ministre chargé des transports (MEEM)
	Finances	Ministre chargé de l'économie et des finances
	Industrie	Ministre chargé de l'industrie

En-dehors de ce cadre particulier relatif aux opérateurs, la gestion de crise de sécurité civile en France est organisée en quatre niveaux : communal, départemental, zonal, et national. Ils sont résumés ci-dessous et leurs rôles sont détaillés en annexe. Les crises impliquant une coupure de réseaux techniques sont couvertes par le dispositif ORSEC (Organisation de la Réponse de Sécurité Civile) dénommé RétaP'réseaux présenté également dans cette section. Il met en évidence le questionnement opérationnel de la sécurité civile française autour de l'étude et de la gestion des effets cascade.

1.2.1 Réseaux techniques, et secteurs d'activités d'importance vitale

Le Secrétariat Général de la Défense et de la Sécurité Nationale (SGDSN) définit les activités d'importance vitale comme étant « un ensemble d'activités, essentielles et difficilement substituables ou remplaçables, concourant à un même objectif ou visant à produire et à distribuer des biens ou des services indispensables ». [SGDSN, 2015] L'arrêté du 2 juin 2006 [JO, 2006], modifié par l'arrêté du 3 juillet 2008 [JO, 2008], définit la liste des SAIV et leurs ministres coordonnateurs. Quatre secteurs sur douze correspondent aux réseaux techniques : gestion de l'eau, énergie, transports et communications électroniques audiovisuel et information.

Chaque ministre coordonnateur d'un SAIV désigne les Opérateurs d'Importance Vitale (OIV). Chaque opérateur nomme un délégué pour la défense et la sécurité qui élabore son Plan de Sécurité d'Opérateur (PSO) et le transmet accompagné de la liste des Points d'Importance Vitale (PIV) proposés. A chaque PIV est associé un délégué pour la défense et la sécurité. A l'échelle du PIV est rédigé par l'opérateur un Plan Particulier de Protection (PPP).

Chapitre 1 : Etude des effets cascade entre réseaux d'infrastructures et de leurs impacts sur la gestion de crise

Le dispositif SAIV vise d'une part à « définir et appliquer des mesures de sécurité pour la protection prioritaire des PIV contre la menace terroriste, et d'autre part, à faciliter les relations entre les opérateurs et les pouvoirs publics, afin de permettre l'application optimale (par les autorités publiques et par les opérateurs) des mesures de vigilance, de prévention et de protection inscrites dans la planification gouvernementale VIGIPRATE.» [IGI 66600, 2014]. Ce rapport ne s'intéresse pas seulement au risque terroriste, et d'autres obligations réglementaires concernent les autres risques (événements naturels par exemple). Cependant l'approche SAIV concerne spécifiquement les opérateurs de réseaux techniques étudiés dans ce mémoire. De plus, il met en valeur la nécessaire gradation géographique de la planification, qui est exposée dans le paragraphe suivant. Enfin, ces trois échelles d'observation (catégorie de réseaux, opérateur de réseau, infrastructure ou PIV) vont être utilisées dans la partie méthodologie d'analyse des réseaux techniques car le processus SAIV justifie de la possibilité technique de ce découpage.

1.2.2 Acteurs de la planification et de la gestion de crise dans la sécurité civile en France

La gestion de crise en France est séparée en quatre niveaux, communal, départemental, zonal et national, en fonction de l'importance de l'évènement à gérer. Cependant les acteurs ne sont pas seulement mobilisés pour la gestion d'une crise, mais également en amont pour les parties réglementaires et la mise en place d'une planification. Les acteurs présentés ci-dessous sont sélectionnés suivant leurs rôles potentiels concernant des crises relatives à la défaillance de réseaux techniques. La défaillance majeure d'un réseau technique dépasse la compétence du niveau communal, qui n'est donc pas présentée.

1.2.2.1 Acteurs réglementaires, de planification ou de gestion de crise au niveau ministériel

Le SGDSN, direction de la protection et de la sécurité de l'État, « assure la coordination de la défense civile de l'État : il est la tête du réseau interministériel des Hauts Fonctionnaires de Défense et de Sécurité (HFDS) et il assure (conjointement avec le directeur général de la sécurité civile et de la gestion des crises – DGSCGC – du Ministère de l'intérieur) la tête du réseau des préfets de zone de défense et de sécurité. Il est également commissaire général aux transports. » [CGEDD, 2013]. Tous les ministères responsables de SAIV doivent fournir à la commission interministérielle des SAIV, présidée par le SGDSN, une analyse des risques les concernant. La direction de la Protection et de la Sécurité de l'Etat (PSE) du SGDSN est également en charge de l'organisation des exercices nationaux de gestion de crise. De plus, « le SGDSN coordonne les actions des ministères en matière de planification de crise (quelle que soit son origine : malveillance, risque naturel, risque technologique) : Vigipirate, documents de planification prescrits par le code de la défense : DNS (Directives Nationales de Sécurité), PSO, PPP et PCA (Plan de Continuité d'Activité). » [CGEDD, 2013].

Le Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (MEEM, ancien MEDDE) est le principal ministère de tutelle des SAIV relatifs aux réseaux techniques. Il a une responsabilité importante en termes de coordination de la protection des réseaux techniques inclus dans un SAIV. Ses Directions Générales sont responsables des réseaux de transports

Chapitre 1 : Etude des effets cascade entre réseaux d'infrastructures et de leurs impacts sur la gestion de crise

terrestres et des ports, des aéroports et du transport aérien, du transport et de la distribution d'énergie, incluant le réseau électrique, des réseaux d'eau et d'assainissement. La DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques) est en charge de la définition de la doctrine du ministère en matière de risques. C'est cependant aux DG de la faire appliquer aux OIV. « La DGPR se concentre sur la protection des vies humaines et il en résulte que la réduction de la vulnérabilité des réseaux passe au second plan. La répartition des responsabilités, sur le sujet des risques naturels, entre la DGPR et les autres DG aurait à être clarifiée.» [CGEDD, 2013].

En parallèle des DG et de la DGPR, le secrétariat général possède le SDSIE (Service Défense, Sécurité, Intelligence Economique), responsable de la planification, de la formation, des exercices sectoriels, et des réponses susceptibles d'être apportées aux crises relevant du champ de compétence du ministère. Le SDSIE inclut le Centre Ministériel de Veille Opérationnelle et d'Alerte (CMVOA) [CMVOA, 2009]. Il rédige le retour d'expérience des crises réelles, et est responsable de la création des outils méthodologiques ou de planification de crise [CGEDD, 2013]. Le SDSIE rédige également un guide sur le dispositif ORSEC dédié aux réseaux : ORSEC RetAp Réseaux, détaillé après.

Rôles particuliers du ministre de l'intérieur et du premier ministre

Le Ministère de l'Intérieur a un rôle coordonnateur du SAIV « activités civiles de l'Etat » et de leur mise en œuvre, sans empiéter sur les tutelles des autres ministères, via les Services du Haut Fonctionnaire de Défense (SHFD) [IGI 66600, 2014]. Il s'appuie en particulier sur une direction dédiée à cela : la Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion des Crises – DGSCGC. Il a à sa disposition le COGIC : Centre Opérationnel de Gestion Interministérielle des Crises qui renforce le dispositif déjà mobilisé. Si la crise est majeure et intersectorielle, le **Premier ministre** peut activer une Cellule Interministérielle de Crise (CIC).

1.2.2.2 Acteurs règlementaires, de planification ou de gestion de crise aux niveaux zonal et départemental

Au niveau départemental, le préfet exerce la responsabilité de la défense civile et de la sécurité. Il est assisté par le service interministériel régional des affaires civiles et économiques de défense et de la protection civile (SIRACEDPC), en charge des missions de sécurité civile. Il a trois missions principales : la planification, la prévention, l'information et la sensibilisation des populations. C'est lui qui « monte une cellule de crise au sein du centre opérationnel départemental (COD) et coordonne les différents services intervenant (police, gendarmerie, pompiers, SAMU, services de l'Etat...) sous l'autorité du préfet. » [NORD, 2015] La France compte cinq Zones de Défense et de Sécurité (ZDS) en outre-mer et sept en France métropolitaine, dont la région Île-de-France, qui a une organisation différentes des six autres (voir annexe X). Le préfet de zone est un préfet de l'un des départements qui composent la ZDS. Il « coordonne ou dirige les activités de défense civile de son ressort territorial » [CGEDD, 2013]. Il est assisté par un délégué ministériel de zone (DMZ), lui-même aidé par un adjoint défense et sécurité (ADS), dans la préparation des plans de prévention et dans la gestion technique des crises. Le préfet de zone est également assisté par un préfet délégué à la

Chapitre 1 : Etude des effets cascade entre réseaux d'infrastructures et de leurs impacts sur la gestion de crise

défense et à la sécurité (ou préfet délégué de zone) et par un chef d'état-major de zone. « Le préfet de zone peut se voir confier une autorité sur les préfets de département lorsque la sûreté de l'État est mise en cause. » [NORD, 2015].

Le préfet, respectivement de département ou de zone, coordonne toutes les actions des intervenants en s'appuyant sur le dispositif d'organisation de la réponse de sécurité civile (ORSEC), décliné respectivement à l'échelon départemental ou zonal. Ce plan est décliné en deux types de dispositions [MEMENTOMAIRE, 2012].

- les dispositions générales contenant :
 - les éléments communs à la gestion d'une situation, comme l'organisation des structures de commandement, les procédures de vigilance et d'alerte des services, les premiers déclenchements de procédures (fiches d'aide à la décision) et les procédures d'alerte et d'information des populations ;
 - l'organisation des missions pré-identifiées, appelées modes d'action, concernant entre autre « porter secours à de nombreuses victimes », ou « faire face aux graves perturbations des réseaux » ;
- les dispositions spécifiques, appliquées à des risques identifiés, avec notamment les effets de ces risques, les scénarios, les contre-mesures adaptées ou les actes réflexe des services.

1.2.3 Dispositif ORSEC Réta'Réseaux

La DGSCGC a publié un guide départemental et zonal sur la rédaction de plans ORSEC et les modes d'action pour le rétablissement et l'approvisionnement d'urgence des réseaux d'électricité, de communications électroniques, d'eau, de gaz et d'hydrocarbures. Ce plan différencie plusieurs niveaux de réponse de l'opérateur. La **Figure 5** illustre bien que la réponse de l'Etat vient seulement en complément de la réponse de l'opérateur, et uniquement en situation exceptionnelle pour répondre aux effets sur la population d'une défaillance de ces réseaux. Le plan la définit alors comme une situation « où les perturbations sont telles que, face aux besoins de la population, la réponse qui doit être apportée dépasse les capacités mêmes de l'opérateur. L'Etat décide alors d'intervenir avec l'ORSEC en appui aux opérateurs impactés, dont la réponse opérationnelle propre maximale est maintenue. » [ORSEC Réta'Réseaux, 2015] La section ci-dessous synthétise les aspects principaux de ce dispositif qui mettent en valeur l'intérêt et le contexte de cette thèse.

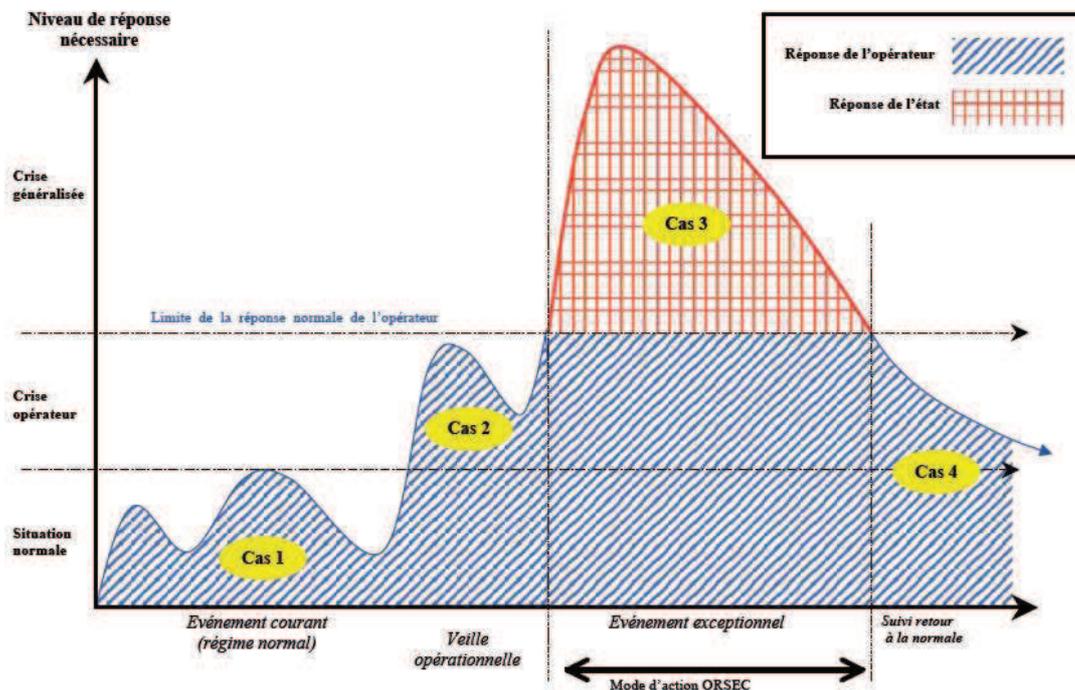


Figure 5 : La réponse de l'opérateur complétée par la réponse de l'Etat [ORSEC Réta'Réseaux, 2015]

Le guide souligne l'importance de travailler sur les effets cascade, notamment en planification. D'ailleurs, certains des objectifs de planification de la description des réseaux sont explicitement de « permettre aux acteurs :

- d'appréhender le contexte de leur action ;
- d'identifier les faiblesses et interdépendances majeures des réseaux ;
- d'identifier l'ensemble des acteurs intervenant pour les réseaux ;
- d'appréhender les besoins possibles en situation dégradée ;
- d'identifier le type de données nécessaires à la gestion des effets de l'événement » [ORSEC Réta'Réseaux, 2015].

Cette citation souligne le besoin de connaître les « faiblesses », donc les vulnérabilités de chaque réseau, quand les étapes de planification soulignaient également la connaissance des « mesures techniques palliatives », donc pour partie des capacités de résilience de ces réseaux.

Les descriptions de ces réseaux doivent être réalisées à l'échelle de chaque département et zone de défense et de sécurité, en cohérence avec l'échelle de rédaction du dispositif ORSEC. Le sujet de cette thèse concerne ainsi, pour la sécurité civile, les acteurs de la ZDS.

Ce dispositif ORSEC Réta'Réseaux « dresse une liste de réseaux dont le bon fonctionnement revêt un caractère critique pour les populations, et dont le rétablissement est prioritaire par

Chapitre 1 : Etude des effets cascade entre réseaux d'infrastructures et de leurs impacts sur la gestion de crise

rapport à celui d'autres réseaux (ou conditionne celui de ces autres réseaux). Ces réseaux critiques ou « structurants » sont les suivants : réseau électrique (transport et distribution), réseau de communications électroniques, réseaux d'eau et d'assainissement, réseaux de gaz et de distribution d'hydrocarbures. » [CGEDD, 2013]. Aucun réseau de transport de personnes ou de marchandises (routes, réseau ferré, voie d'eau...) n'est évoqué. Or le rétablissement des réseaux précédents peut nécessiter l'acheminement par la route de personnel et de matériel. Cette liste a été définie en fonction de la préservation des besoins vitaux de la population dans un premier temps, le maintien (ou le rétablissement) d'un minimum d'activité économique venant dans un second temps.

Pour gérer les effets de l'évènement, le plan établit une hiérarchie des usagers à rétablir, en distinguant une crise d'une situation de délestage, qui vise justement à éviter une crise et n'est que temporaire, et pour laquelle une liste d'usagers bénéficiant d'un service prioritaire a été réalisée en amont. Pour le réseau électrique, ceux-ci appartiennent soit à des établissements de santé, soit à des installations de signalisation et d'éclairage de la voie publique, soit à des installations industrielles dont l'arrêt brutal de fonctionnement pourrait leur causer des dommages [ORSEC RétaP'Réseaux, 2015]. Ces listes sont déjà intégrées dans des actions automatisées de délestage, dont la rapidité d'évènement est bien supérieure à celle de l'intervention humaine.

Si ces listes déjà existantes peuvent servir de base de recensement, elles doivent être adaptées à la situation réelle et au contexte d'une défaillance longue, compatible avec les délais de réactivité de l'Etat. Le département doit donc établir à froid une liste des usagers potentiellement sensibles (à différencier des usagers prioritaires) avec une double approche [ORSEC RétaP'Réseaux, 2015].

- Approche par besoins : il s'agit de lister les usagers potentiellement sensibles au vu de leur activité ou de leur nature, et d'identifier les conséquences d'une rupture de chaque réseau (électricité, télécommunications, gaz, eau et assainissement et hydrocarbures). Il s'agit également de connaître les « moyens de résilience » du réseau et le délai d'autonomie de l'utilisateur.
- Approche par conséquences : Il s'agit d'une première forme d'analyse des effets cascade, car cela concerne les conséquences d'une défaillance de chaque usager sensible sur un territoire donné et d'identifier au préalable les autres usagers sensibles rattachés à celui-ci. « Le recensement des points remarquables servant au fonctionnement des différents réseaux permet d'en déduire par un travail prospectif quel serait l'impact sur la population desservie en cas de rupture / perte / arrêt... de l'infrastructure visée sur une zone géographique donnée. Cette évaluation préalable permet principalement, lorsque l'évènement survient, d'avoir, pour l'autorité publique, une évaluation instantanée de l'impact potentiel sur la population, immédiat ou à terme. » [ORSEC RétaP'Réseaux, 2015]

Cette dernière approche souligne l'intérêt opérationnel d'analyser les effets cascade, et introduit la notion de « zone d'impact » associée à des points remarquables des réseaux – notion proche du PIV. Cette approche relativement simple telle que définie ici, a évidemment

Chapitre 1 : Etude des effets cascade entre réseaux d'infrastructures et de leurs impacts sur la gestion de crise

des limites, au sens où elle fait un « bilan approximatif et *a priori* des impacts immédiats ou futurs sur la population » et qu'elle « n'intègre pas nécessairement toutes les modalités d'exploitation technique des réseaux qui visent à compenser, sans effets sur les populations, la perte d'un point remarquable dudit réseau (maillage, rebouclage, substitution...) » [ORSEC Réta'Réseaux, 2015].

Une fois que les usagers potentiellement sensibles sont identifiés, ils sont classés suivant leurs conséquences potentielles directes et immédiates selon cinq axes, avec une note sur 5 représentant la gravité de l'enjeu : l'enjeu « vie humaine », l'enjeu « réseaux », l'enjeu « économie », l'enjeu « environnement » et l'enjeu « sûreté et sécurité ».

Cette démarche de recensement à froid est complétée en gestion de crise par les éléments recueillis sur le terrain, notamment sur [ORSEC Réta'Réseaux, 2015] :

- les dommages matériels de l'utilisateur ;
- la période de l'événement (saison froide ou chaude, période touristique ou non, ...) ;
- leur « capacité palliative (connue *a priori*) ou leur résilience (par exemple : le groupe électrogène a-t-il démarré, quelle est son autonomie ? Les réservoirs d'eau potable sont-ils pleins ? Quelle est la durée d'alimentation en eau potable de la population desservie par le réseau d'adduction public concerné en gravitaire et non gravitaire ?) » ;
- la « faisabilité technique (par exemple : peut-on rétablir l'utilisateur ? Peut-on techniquement mettre en place un approvisionnement d'urgence ?) » ;
- « les capacités de l'opérateur (Quelles sont-elles ? Avec quels délais ? Où trouver des moyens complémentaires ?) » ;
- « le délai prévisible de mise en œuvre par rapport à la durée prévisible de l'événement intégrant la durée durant laquelle le site va pouvoir faire face de manière autonome par exemple : niveau des réservoirs d'eau potable, estimation de l'autonomie au regard de la consommation aval (éventuelle mise en œuvre de restrictions), et délai d'acheminement des groupes électrogènes pour rétablir la production » ;
- « la recherche d'une solution plus adaptée (qui ne sera pas forcément l'approvisionnement d'urgence) » ;
- « la mise en place d'une démarche coordonnée sur les réseaux ».

Au vu de la quantité d'informations à rassembler, le guide ORSEC Réta'Réseaux souligne l'importance d'avoir un système d'information pour l'ensemble des acteurs territoriaux et des opérateurs concernés, en gestion de crise mais également en planification. Ces informations brutes sont rassemblées dans un outil de synthèse possédant à la fois les données des opérateurs et « un espace collaboratif dédié de l'outil portail ORSEC (qui permet un partage instantané de données avec hiérarchisation des droits). Les indicateurs prédéfinis ne permettent pas de couvrir toutes les situations. Ils constituent une première base d'échanges d'informations, préparée à l'avance. » [ORSEC Réta'Réseaux, 2015]. Les indicateurs d'informations ne sont pas explicités dans ce guide. L'étude des effets cascade entre les réseaux techniques dans cette thèse a pour but de proposer des catégories d'indicateurs par réseaux techniques, notamment des cartographies de zones d'impact, et des indicateurs de

Chapitre 1 : Etude des effets cascade entre réseaux d'infrastructures et de leurs impacts sur la gestion de crise

vulnérabilité et de résilience. Il est à noter que dans le cadre de l'exercice Sequana, une plateforme collaborative a été mise en place pour un échange de données. Elle est décrite dans le paragraphe 1.4.

1.1.3. Les opérateurs de réseaux techniques, la planification et la gestion de crise

Il faut distinguer les responsabilités selon que l'on s'intéresse aux gestionnaires de réseaux (opérateurs) qui ont la responsabilité de service ou aux institutions publiques. Le guide ORSEC [ORSEC RétaP'Réseaux, 2015] distingue plusieurs niveaux de réponse pour les opérateurs (voir **Figure 5**). Le cas 1 correspond au fonctionnement normal du réseau et à la gestion des incidents courants. Le cas 2 correspond aux situations où le fonctionnement normal du réseau est affecté et pour lesquelles l'opérateur est en « crise ». Cela nécessite la mise en place de procédures internes avec des moyens spécifiques. L'existence d'un PCA permet de faciliter cette gestion, notamment via son analyse de différents scénarios de crise et des mesures à associer (voir le guide pour réaliser un plan de continuité d'activité [SGDSN, 2013]). Le cas 3 correspond à une situation « où les perturbations sont telles que, face aux besoins de la population, la réponse qui doit être apportée dépasse les capacités mêmes de l'opérateur. L'Etat décide alors d'intervenir avec l'ORSEC en appui aux opérateurs impactés, dont la réponse opérationnelle propre maximale est maintenue. » [ORSEC RétaP'Réseaux, 2015]. Enfin le cas 4 correspond au désengagement de l'Etat suite à une amélioration de la situation, à un niveau où l'opérateur peut gérer par lui-même celle-ci jusqu'au retour au fonctionnement normal.

Cette distinction de niveau de gestion sera reprise dans la méthode développée pour la thèse sur l'analyse de vulnérabilité et de résilience des réseaux.

Le guide définit également la « crise généralisée », qui correspond aux situations où plusieurs réseaux sont fortement perturbés en même temps, rendant impossible la gestion opérateur par opérateur de la situation. L'Etat intervient alors *a minima* pour la coordination des actions de rétablissement et l'arbitrage des priorités.

Enfin, la planification s'appuie également sur l'organisation d'exercices pour tester les planifications. La section ci-dessous présente un exercice en Île-de-France qui a sensibilisé les participants à l'importance de prendre en compte ces effets cascade dans leur planification. L'intégration d'un effet cascade au scénario a permis d'améliorer le réalisme de celui-ci. La section suivante présente une illustration des contraintes et questions opérationnelles que les opérateurs de réseaux pourraient rencontrer en gestion de crise en France.

1.2.4 L'exercice crue centennale en Île-de-France : Sequana 2016

1.2.4.1 *Le contexte, le scénario et les participants*

La crue centennale de la Seine est considérée comme le risque majeur en Île-de-France. Elle s'est déjà produite en 1910, et à d'autres reprises avec des phénomènes de moindre ampleur : 1924 (crue triennale), 1982 et 2001. Les enjeux humains, économiques et sociétaux se sont entre temps énormément densifiés dans ces zones inondables. L'OCDE (Organisation de

Chapitre 1 : Etude des effets cascade entre réseaux d'infrastructures et de leurs impacts sur la gestion de crise

Coopération et de Développement Economiques) a publié en 2014 une étude sur la gestion des risques d'inondation de la Seine (**Figure 6**) qui a permis d'évaluer les impacts potentiels d'un tel évènement. Elle estime qu'il toucherait 5 millions de franciliens en tenant compte des défaillances des réseaux techniques, pour un coût allant de 3 à 30 milliards d'euros en dommages directs [OCDE, 2014]. Celle-ci souligne également les progrès accomplis pour améliorer la résilience de cette région, notamment via le dispositif ORSEC. Le secrétariat général de la zone de défense de Paris a mis en place des groupes de travail thématiques sur la gestion d'une telle inondation (secteurs du transport, de l'énergie, de la banque, des télécommunications, de la distribution, etc.) et a réalisé un exercice de simulation en 2010 puis un autre en 2016 : Sequana. Ces travaux ont ainsi créé une dynamique autour des questions de prévention entre les acteurs de la gestion de crise. La directive européenne relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation [EU inondation, 2007] a été déclinée sur ce Territoire à Risque Important (TRI) en stratégie de gestion des risques d'inondation, assortie à une gouvernance co-pilotée par le préfet de région et le préfet de police. Celle-ci a donné lieu à la signature en avril 2016 par les grands opérateurs de réseaux d'une déclaration d'intention de partage de données et de travail sur les vulnérabilités et dépendances des réseaux franciliens (action co-pilotée par la Direction Régionale et Interdépartementale de l'Environnement et de l'Energie, et le SGZDS-Préfecture de Police). [DECLARATION D'INTENTION, 2016]

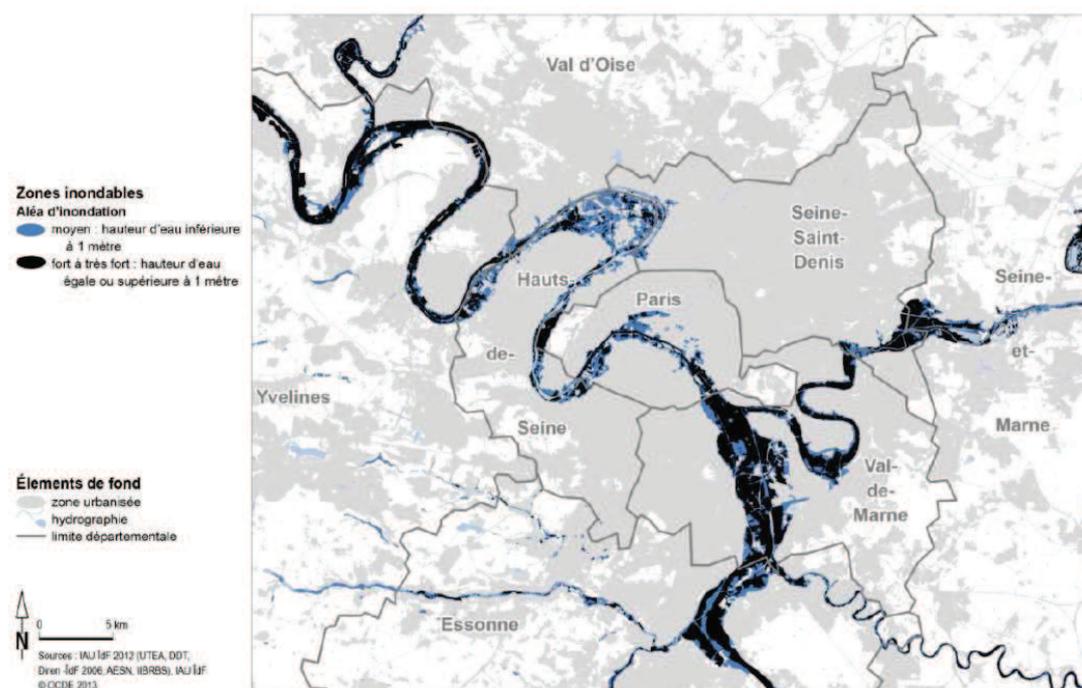


Figure 6 : Carte de la zone inondable en cas de crue centennale [OCDE, 2014]

L'exercice Sequana avait quatre objectifs [Plaquette de présentation Sequana, 2016] :

- éprouver la capacité de tous les acteurs des différents secteurs d'activité à gérer une crue centennale, à coordonner les actions de tous au plan zonal, à évaluer leur

Chapitre 1 : Etude des effets cascade entre réseaux d'infrastructures et de leurs impacts sur la gestion de crise

- pertinence et la cohérence de ces dispositifs entre secteurs d'activité, et à améliorer les plans existants ;
- donner au SGZDS Paris une vue d'ensemble de la coordination globale de la planification ;
- améliorer la capacité de réponse de la sécurité civile et éprouver la coopération civilo-militaire avec l'utilisation de la force Neptune (mise en œuvre du Mécanisme Européen de Protection Civile MEPC) ;
- éprouver chez les partenaires de l'exercice les capacités de réaction du personnel chargé de la sécurité des biens, tester les procédures opérationnelles internes et la remontée d'information vers les autorités publiques, tester les plans de continuité d'activité.

Pour répondre à ces objectifs, l'exercice s'est déroulé en trois phases, du 7 au 18 mars 2016. La première semaine a été consacrée à un exercice simulant la montée de la crue centennale. Matin et soir, des cartes, des bulletins météorologiques et des points de situation permettaient de simuler cette évolution. Le niveau fictif centennal a été atteint le vendredi 11 mars. Le week-end du 12 et du 13 mars a accueilli des manœuvres terrain de démonstration. La Belgique, l'Espagne, l'Italie et la République tchèque ont participé à cet exercice. La deuxième semaine s'intéressait à la décrue de la Seine dans un format différent de la première semaine. Il s'agissait de réfléchir aux actions de retour à la normale, en les hiérarchisant vis-à-vis des enjeux prioritaires secteur par secteur, et en testant la « résilience des réseaux aux conséquences matérielles, fonctionnelles et structurelles » [Plaquette de présentation Sequana, 2016]. En effet, la décrue jouée n'interviendrait qu'après une période d'étiage de plusieurs jours, ce qui pose les questions de la résistance des infrastructures et de la voirie face à une inondation longue. Ce délai pendant lequel les équipes ne pourront pas directement intervenir permettra néanmoins d'acheminer les matériels et les équipes nécessaires aux opérations spécifiques (pompage, dépollution, évacuation des déchets, vérification des installations techniques, etc...). Cet exercice a été financé en partie par la Commission Européenne avec une subvention de 739 000 euros via le programme ECHO (service d'aide humanitaire et de protection civile de la commission européenne). L'exercice européen Sequana a rassemblé 87 partenaires, répartis dans les secteurs médicaux, bancaires, assurantiels, académiques, miniers, acteurs de sécurité civile, institutions publiques, centre de rétention, médias, et opérateurs de réseaux techniques.

Enfin le SGZDS Paris participe en parallèle au projet de recherche Euridice, qui a pour but de modéliser entre autres les interactions entre les différentes cellules de crise [EURIDICE, 2016]. Ce projet a observé plusieurs gestions d'évènements majeurs (COP 21 par exemple), et a couvert l'observation de l'exercice Sequana. Cependant au vu du nombre très important de participants à cet évènement, l'équipe d'Euridice a fait appel à des chercheurs extérieurs pour couvrir l'ensemble des cellules de crise, et l'auteur a eu l'opportunité de pouvoir s'inscrire dans ce réseau d'observateurs. En plus des cellules de crise situées chez chaque partenaire, une cellule animation a permis de répondre aux questions des participants sur la situation potentielle du terrain. Cette cellule était composée entre autres de représentants des opérateurs de réseaux essentiels comme les réseaux électriques, les réseaux de télécommunication, les

Chapitre 1 : Etude des effets cascade entre réseaux d'infrastructures et de leurs impacts sur la gestion de crise

réseaux de transports en commun, les réseaux d'eau, de gaz ou d'assainissement. Cette cellule animation a été maintenue en phase de décrue.

1.2.4.2 Le déroulé de l'exercice

En phase de crue, la journée de simulation commençait chaque matin par un point de situation avec un bulletin hydrologique, météorologique, ainsi qu'un état actualisé des victimes/déplacés et des clients touchés par des coupures de réseaux.

Les participants s'appuyaient sur le portail CRIS'ORSEC, web-plateforme sécurisée et ouverte uniquement aux acteurs concernés par cette gestion de crise, pour communiquer les faits marquants ou leurs demandes à la sécurité civile. Il pouvait s'agir par exemple de GRT qui déclare une fuite de gaz à telle adresse, d'ERDF qui annonce que tel poste client est coupé préventivement, ou bien d'un opérateur de réseau d'eau qui demande à la préfecture un laissez passer pour ses équipes d'intervention afin d'accéder à un équipement technique.

En plus du portail ORSEC, les participants avaient accès à une plateforme cartographique en ligne (Web ArcGIS Platform). Sur cette plateforme de visualisation, on pouvait voir deux fois par jour l'actualisation des zones inondées sur l'Île de France, mais également les routes coupées, les zones de fragilité électrique d'ERDF et les zones de fragilité des communications filaires d'Orange. Ces trois dernières informations ont été primordiales dans l'évaluation de la pertinence des réponses des acteurs. En effet, elles ont favorisé la prise de conscience des problèmes d'accessibilité pour les équipes d'intervention – notamment vis-à-vis du franchissement de la Marne et de la Seine en période de crue. La cartographie des zones de fragilité électrique a également fortement impacté les différents participants, qui n'avaient pas toujours conscience d'être potentiellement privés d'électricité alors même qu'ils n'étaient pas inondés, et donc de devoir adapter leur plan de réaction à cette situation. *Idem* pour les zones de fragilité des télécommunications : si Orange garantit une communication mobile à l'extérieur des bâtiments, la bande passante autorisée sera bien plus réduite, et nombre de techniciens utilisent aujourd'hui des outils embarqués nécessitant une connexion mobile avec des envois de données. De plus la communication vers les infrastructures dont la ligne fixe est indisponible nécessite de connaître les numéros de mobiles des personnes sur place... si celles-ci ont pu accéder au site (dépendance à la praticabilité des routes).

Deux points de situation étaient réalisés dans la journée : un à 14 h, et l'autre à 16 h. Cependant, à chaque début de journée, il était impossible de reprendre le point de situation de la veille, car les zones de fragilité électrique et de télécommunications étaient pré-calculées, et les actions terrains pré-organisées. Il y a donc eu certaines fois un écart entre la situation de la veille, résultant des décisions prises par les joueurs, et la reprise du scénario initialement prévu le jour d'après.

Les impacts sur les réseaux électriques, les télécommunications et le réseau routier ont fait prendre conscience aux participants de leur vulnérabilité potentielle aux effets cascade. Par ailleurs, il est à noter que les zones de fragilité de télécommunications d'Orange était calculée

Chapitre 1 : Etude des effets cascade entre réseaux d'infrastructures et de leurs impacts sur la gestion de crise

à la fois sur les zones inondées ET sur les zones privées d'électricité, donc en intégrant un premier effet cascade technique.

1.1.4. Conclusion sur la planification et la gestion de crise en France relatives aux défaillances de réseaux techniques

Les réseaux techniques appartiennent à des secteurs d'activité d'importance vitale. La démarche SAIV repose sur un découpage en trois niveaux : le domaine du réseau technique, les opérateurs de réseaux techniques puis les points d'importance vitale par opérateur, qui correspondent à l'échelle de l'infrastructure. Cette démarche est encadrée au niveau national par le SGDSN et par les différents ministères de tutelle, en particulier par le MEEM. La DGSCGC, sous la direction du Ministère de l'Intérieur, a rédigé un guide méthodologique à destination des échelons zonal et départemental pour le dispositif ORSEC dédié au rétablissement et à l'approvisionnement d'urgence des réseaux électricité, communications électroniques, eau, gaz, et hydrocarbures. Ce guide différencie différents niveaux de réponse de l'opérateur en fonction des capacités de gestion de celui-ci, et donc les conditions de l'intervention de l'Etat. Celui-ci a un rôle de coordination - si plusieurs réseaux sont défaillants - et un rôle d'arbitrage des priorités. Les différentes méthodes développées dans cette thèse vont reprendre ce découpage en trois niveaux d'analyse des réseaux, puis en différents niveaux de crise par infrastructure.

L'arbitrage des priorités s'appuie pour partie sur un travail de planification via l'étude des usagers sensibles. Celle-ci met en avant la nécessité pour la sécurité civile de connaître la vulnérabilité et la résilience de chaque « point remarquable » des réseaux, ainsi que sa zone géographique d'impact avec les enjeux associés (autres points remarquables). D'ailleurs, l'utilisation de zones d'impact pré-calculées tenant compte d'effets cascade a amélioré le réalisme de l'exercice Sequana et donc la pertinence des décisions prises par les opérateurs de réseau technique. Bien que présentant des limites, la construction de « zones d'impact » constitue une première brique pour la modélisation d'effets cascade potentiels, qui sera explorée et approfondie dans le cadre de ce travail de thèse.

Les observations des participants à Sequana ont permis de mieux comprendre les capacités techniques d'adaptation des différents opérateurs, et donc de poser des contraintes techniques, d'appréhender les incertitudes de réaction, et les priorités techniques de rétablissement entre réseaux. Toutes ces observations ont été utilisées pour distinguer l'utilité des différents types de modélisation des effets cascade.

Enfin, pour le gestionnaire de réseau, la connaissance de la vulnérabilité et de la résilience de son réseau, notamment vis-à-vis des effets cascade, apporte également une capacité supplémentaire de gestion de crise ou de planification, en appréhendant mieux le contexte de ses actions, ses interdépendances à d'autres réseaux et ses besoins potentiels en situation dégradée.

1.3 Positionnement de la thèse face aux besoins opérationnels

Le retour d'expérience de la crise Sandy, le guide de planification ORSEC Retap réseau ou encore l'exercice de gestion de crue Sequana ont tous mis en évidence les intérêts opérationnels à travailler sur la vulnérabilité, la résilience et les effets cascade entre réseaux techniques. Cette thèse se concentre sur la modélisation des effets cascade dans un contexte de planification ou de gestion de crise pour les opérateurs et la sécurité civile. Ces deux acteurs ont des objectifs différents. La sécurité civile, et particulièrement la Zone de Défense et de Sécurité, a un rôle de coordonnateur des actions envisagées lorsque les capacités propres des gestionnaires de réseaux sont dépassées [Grangeat, 2015, d]. Cela signifie qu'elle a besoin de connaître les seuils de vulnérabilité et de résilience des réseaux face aux différents scénarios, sans pour autant avoir besoin de connaître le détail des procédures internes. Elle a également besoin d'avoir une vue d'ensemble à travers l'évaluation des conséquences de la défaillance d'un réseau : effets cascade sur le fonctionnement des autres réseaux techniques, mais aussi évaluation des conséquences sur la société. Ce besoin opérationnel correspond au chapitre 3 de la thèse. Pour obtenir les seuils de vulnérabilité et de résilience utiles à la sécurité civile, les opérateurs de réseaux techniques doivent appliquer une méthode commune d'évaluation de la vulnérabilité et de la résilience de leur réseau d'infrastructure, qui doit être transposable aux différentes spécificités des réseaux et des scénarios. Cependant, les opérateurs ont également un besoin propre d'évaluer ces seuils. En effet, ils ont des exigences réglementaires de service en tant qu'opérateurs d'importance vitale et des contrats à respecter en tant qu'entreprise. L'étude de la cohérence entre leurs moyens et procédures planifiées et leurs objectifs de retour en fonctionnement permet d'identifier leurs points faibles et forts de leurs capacités de résilience, et donc les axes d'amélioration. De plus la définition de seuils de vulnérabilité et de résilience permet aux opérateurs de mesurer l'évolution de ceux-ci avec les changements dans leur planification ou dans leurs équipements. Cette démarche a donc un double intérêt. Elle est explorée dans le chapitre 4.

En résumé, le double questionnement de ce travail de thèse se positionne vis-à-vis des besoins opérationnels : comment modéliser les effets cascade entre réseaux techniques pour mieux planifier et gérer une crise du point de vue de la coordination – la sécurité civile – et du point de vue des opérateurs de réseaux ? Comment mesurer les vulnérabilités et les résiliences des réseaux techniques face aux différents scénarios, en prenant en compte ces effets cascade ?

Le chapitre 2 explore les méthodes existantes dans la littérature, qui proposent une modélisation des effets cascade et une évaluation de la vulnérabilité et de la résilience.

2 Etat de l'art

Ce chapitre explore des définitions et méthodes qui existent dans la littérature autour du questionnement opérationnel de cette thèse. Il montre que le besoin opérationnel précédemment souligné correspond également à un manque scientifique. La première section étudie les différentes définitions des termes réseaux techniques, infrastructures, vulnérabilité, résilience, interdépendances entre systèmes ou en encore effets cascade. L'auteur met en perspective ces différents points de vue avec les contraintes des projets qui encadrent cette thèse, et sélectionne finalement les termes les plus adaptés à celles-ci. La deuxième section analyse les méthodes existantes de la modélisation des effets cascade entre réseaux techniques dans la littérature. Elle les sépare en deux catégories d'approches, et met en évidence le besoin de développer une méthode hybride pour répondre au besoin de coordination de la sécurité civile. La troisième section présente différentes évaluations des vulnérabilités et résiliences de réseaux techniques. Elle démontre que beaucoup sont orientées face à un événement donné, sur un réseau donné. Cela montre le besoin de développer une méthode transposable aux spécificités des réseaux, utiles à la fois à la sécurité civile et aux opérateurs. Enfin, la quatrième section résume les manques identifiés, et la cinquième décrit la structure de la thèse pour répondre à la fois à la problématique opérationnelle et aux besoins scientifiques.

2.1 Définition des termes

Aux notions clés utilisées dans cette thèse sont associées de nombreuses définitions différentes selon le contexte de leur emploi et les points de vue des auteurs. Ce paragraphe a pour but d'identifier les différentes polysémies et synonymes des notions de réseaux techniques, infrastructures, vulnérabilité, résilience, d'interdépendances entre systèmes ou en encore d'effets cascade. Les définitions adoptées permettront de mieux comprendre les choix des méthodes d'analyse de vulnérabilité ou de résilience et de modélisation des effets cascade identifiées dans l'état de l'art.

Ce travail est orienté vers la planification et la gestion de crise pour la sécurité civile. La notion de crise sera ici définie comme une crise avec un événement déclencheur, caractérisée par des facteurs de contingence. Dautun distingue sept types de facteurs de contingence, qui sont la localisation de la source de danger, le moment de survenue de l'évènement, la cinétique, la gravité, la présence d'effets cascade, la simultanéité d'évènements similaires et les conditions météorologiques [Dautun, 2007]. La crise ne se limite pas seulement à son événement déclencheur, mais concerne également l'ensemble des développements consécutifs à celui-ci.

2.1.1 Réseaux techniques et infrastructures

Le chapitre 1 a mis en évidence que les réseaux électricité, communications électroniques, eau et assainissement, gaz, hydrocarbures ainsi que les réseaux de transports étaient essentiels au fonctionnement de la société. Ce paragraphe s'intéresse à la définition d'un « réseau », et *a fortiori* d'un « réseau technique ». Il discute de la pertinence des différentes échelles d'analyse de ces derniers.

Chapitre 2 : Etat de l'art

Gleyze [Gleyze, 2005] identifie un réseau comme l'existence d'échanges ou de mises en relations avec des acteurs. Pour parler des réseaux qui nous intéressent ici, il utilise alors le terme de « réseaux d'infrastructures », dans le sens où l'analyse de risques nécessite aux objets d'étude d'être « ancrés matériellement sur le territoire afin de donner prise à l'action physique des phénomènes et de générer en cascade des dommages indirects ». Le Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable utilise également ce terme de « réseaux d'infrastructures » (tout comme Zimmerman [Zimmerman, 2002]), et le précise en distinguant les « réseaux structurants » suivants [CGEDD, 2013] : 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, en excluant les réseaux de transport. Dautun les qualifie plutôt de « réseaux vitaux » en référence aux SAIV [Dautun, 2007]. Gleyze [Gleyze, 2005] distingue lui deux grandes catégories : les réseaux de transports (de personnes et de biens) et les réseaux « techniques » qui acheminent les énergies, informations et ressources. A l'inverse, Lhomme ne semble pas différencier les deux catégories et utilise indifféremment le terme de « réseaux techniques » pour désigner les réseaux routiers et les réseaux électriques, de téléphonie, d'eau et d'assainissement [Lhomme, 2012]. Enfin, les modes d'action du dispositif ORSEC Rétao Réseaux couvrent les réseaux qui font partie des secteurs d'activité d'importance vitale, en excluant les routes.

Si les limites de la notion de « réseaux techniques » sont floues, l'ensemble des définitions précédentes couvre les réseaux étudiés dans le présent travail : les réseaux électriques, les réseaux de télécommunications, les réseaux d'eau et les réseaux de gaz. Le terme « réseau technique » sera donc employé par la suite pour les désigner de façon générique.

Pour le CEPRI (Centre Européen de Prévention du Risque Inondation), un réseau (que nous qualifierons de technique) est :

- « 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. » [CEPRI, 2016]

Le réseau apparaît alors comme un système sociotechnique, et l'on peut séparer artificiellement la couche organisationnelle de la couche technique (structure, flux, connexions).

Le système « réseau technique » est géré par une organisation en interaction avec son écosystème. En revanche, les sous-parties localisées dans l'espace qui composent ce réseau

vont avoir des dépendances techniques localisées différentes des précédentes. Une modélisation des interactions techniques (contrainte opérationnelle) entre réseaux suppose alors de réfléchir à un « découpage » du réseau en plus petits éléments.

La réglementation SAIV, à laquelle obéissent les réseaux techniques, propose déjà un découpage en PIV, c'est-à-dire en « établissement, installation ou ouvrage 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 :

- si son activité est difficilement substituable ou remplaçable, 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. » [IGI66600, 2014]

Cette approche est centrée sur les points qui ont un fort potentiel direct de conséquences pour la nation. Or la modélisation d'un réseau technique nécessite également de prendre en compte les autres sous-parties constitutives du réseau, car c'est l'ensemble des éléments qui permet à un réseau de se reconfigurer et non pas seulement le comportement d'une infrastructure isolée. Cependant l'échelle d'analyse du PIV est intéressante pour estimer les conséquences de la défaillance du réseau sur la société. De plus, si l'on regarde du côté de la réglementation européenne, celle-ci ne s'intéresse pas à des réseaux techniques, mais à des « infrastructures critiques » européennes, appartenant à des catégories d'infrastructures. Il s'avère que les infrastructures critiques européennes sont choisies, en France parmi les PIV [IGI66600, 2014]. L'échelle « établissement, installation ou ouvrage » sera alors qualifiée du terme générique « infrastructure » et constituera notre premier découpage technique des réseaux.

Le mot « établissement » désigne une « unité géographique de production ou d'exploitation. » et le terme « installation » correspond à un « ensemble des objets, des dispositifs et des bâtiments installés en vue d'un usage déterminé. » [IGI66600, 2014] Dans les deux cas, la définition introduit la notion de « fonction » d'une infrastructure. C'est pourquoi ce travail va définir une infrastructure comme « une sous-partie d'un réseau technique organisée autour d'une fonction propre et localisée dans l'espace ». Parmi les fonctions, on peut citer « produire », « exploiter », « transporter de la matière », ou « contrôler ». Cette échelle d'analyse sera exploitée tout le long du rapport. A noter qu'une infrastructure peut être elle-même découpée en éléments techniques ou composants (pompes, transformateurs, circuits de contrôle, etc.) qui concourent à la réalisation de la fonction de l'infrastructure.

2.1.2 Qualification des structures des réseaux et identification des infrastructures

Les réseaux étudiés ici sont les réseaux d'électricité, de communications, d'eau, de gaz, et les réseaux de transport. Ils sont désignés sous le terme générique de réseaux techniques. L'analyse des interdépendances techniques entre réseaux nécessite de définir une échelle plus fine d'analyse que le système. On parle alors d'infrastructure en tant que « sous-partie d'un réseau technique organisée autour d'une fonction propre et localisée dans l'espace ». Une

Chapitre 2 : Etat de l'art

infrastructure peut encore être redécoupée en composants qui concourent à la réalisation de la fonction de l'infrastructure. On obtient donc trois niveaux d'analyse des réseaux techniques.

La Table 4 ci-dessous propose réseau par réseau l'identification de catégories d'infrastructures et l'analyse sommaire de la structure des réseaux de transport ou de distribution. Sept réseaux sont brièvement présentés : le réseau de télécommunications (filaire et mobile), le réseau électrique (transport et distribution), le réseau d'eau potable, le réseau de gaz (transport et distribution), le réseau vapeur de la CPCU (Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain, spécificité urbaine parisienne) et le réseau de carburant par pipelines. Les réseaux de transport locaux (routiers ou ferrés) ne seront pas présentés car même si leur structure est hiérarchisée, elle est fortement variable selon le territoire étudié. Le réseau de transport ferré à l'échelle nationale (SNCF) possède des mailles à l'échelle du territoire national.

Les réseaux électriques de transport et de distribution sont plus amplement détaillés en Annexe 3. Le réseau électrique de transport est conçu pour absorber la défaillance d'une infrastructure *a minima*, voire de deux si l'aléa identifié a une probabilité d'occurrence significative ou des conséquences majeures [RTE, 2015]. Cela signifie que les niveaux de redondance ne sont pas homogènes sur le territoire. Le réseau électrique de transport est adaptable au sens où RTE (entreprise exploitante du réseau) dispose de réserves de puissance mobilisable en cas de déséquilibre soudain entre la production et la consommation (attention, l'électricité ne se stocke pas, ne pas confondre les propos !). Elles sont expliquées en Annexe 3. La réserve la plus rapidement mobilisable est disponible en 30 s. Le réseau moyenne tension possède trois types de structures : le réseau en simple dérivation, la structure en coupure d'artère et la structure en double-dérivation (voir l'annexe pour leur description) qui possèdent chacune une capacité de redondance différente.

Cependant, chaque réseau est inscrit dans son territoire, et répond aux contraintes de celui-ci par une adaptation de sa structure. Pour avoir une analyse plus détaillée, il faut choisir un territoire et décrire ses réseaux structurants dans une limite géographique donnée.

Le CEPRI a souligné qu'un réseau était constitué d'une structure, avec des linéaires et des nœuds. De très nombreux travaux proposent alors de modéliser les réseaux techniques sous forme de graphes mathématiques ([Gleyze, 2005] [Dutozia, 2013] [Dueñas-Osorio, 2009] [Cadini, 2008] [Hines, 2011] notamment). Ils permettent de qualifier les différentes structures des réseaux : arborescentes, arborescentes inversées, maillées, etc. et d'intégrer ces résultats dans des analyses de vulnérabilité et de résilience ou dans des simulations d'effets cascade. L'analyse de graphe est plus spécifiquement adaptée aux infrastructures réalisant la fonction « transporter » du réseau, car ce sont ces infrastructures qui portent les flux, donc les possibilités de reconfiguration, et alimentent les infrastructures de distribution. Nous verrons dans le paragraphe 2.1.3 les limites du graphe dans l'analyse de vulnérabilité et de résilience, et dans le 2.2.4 les avantages de celui-ci pour la modélisation des effets cascade.

Chapitre 2 : Etat de l'art

Ce paragraphe a permis de mieux détailler les réseaux techniques étudiés, depuis leur structure jusqu'à leur infrastructure générale. Il s'agit maintenant de comprendre les différents sens du mot vulnérabilité et de définir celui retenu dans le contexte de ce travail.

Table 4 : Structure des réseaux techniques et infrastructures principales

Réseau	Structure observée	Catégories d'infrastructures
Réseau de téléphonie fixe et réseau fibre optique	Structure arborescente et peu hiérarchisée adaptable	On distingue 5 catégories d'infrastructures : les Sous-Répartiteurs (SR, armoire extérieure qui concentre les fils de cuivre des usagers via les Points de Concentration PC, boîtiers à l'échelle de l'immeuble), l'Unité de Raccordement d'Abonnés (URA, équivalent du Nœud de Raccordement des Abonnés NRA en local), le Cœur de Chaîne (CC, NRA d'agglomération), le Centre de Transit Secondaire (CTS, NRA Régional), et le Centre de Transit CT (appels internationaux). Lorsque les NRA reçoivent un appel, ils vérifient si le destinataire appartient à leur responsabilité locale. Si ce n'est pas le cas, ils transmettent au niveau supérieur l'appel [InfoRéseaux, Télécom, 2011] [InfoRéseaux, NRA, 2009]. Lorsque la boucle locale est en fibre, le principe est analogue, sauf que l'on parle de NRO (Nœud de Raccordement Optique) au lieu de NRA. Les abonnés sont reliés à des points de branchements optiques, eux-mêmes connectés à un point de mutualisation (chambre sous trottoir), connecté ensuite au NRO. [ORANGE, 2016]
Réseau de téléphonie mobile	Structure arborescente hiérarchisée adaptable par élargissement de zones de couverture	On distingue 4 catégories d'infrastructures : les BTS (Base Transceiver Station, sorte d'antenne relais vers le niveau supérieur), les BSC (Base Subsystem Controller ou contrôleur de station de base, qui active/ désactive le canal de transmission et gère les BTS), les MSC (Mobile Switching Center ou centre de commutation des services mobiles, qui contient les informations sur la localisation temporaire des clients), et le GMSC (Gateway MSC, qui permet les passerelles vers les autres réseaux mobiles). Les liaisons BTS-BSC-MSC sont aériennes. Les MSC sont connectés au réseau filaire téléphonique pour transmettre les appels vers les fixes. Les MSC échangent entre eux l'appel jusqu'à localiser le destinataire via le réseau filaire [TélécomPourTous, 2012]. Les secteurs de couverture peuvent être modifiés en cas de crise pour couvrir les secteurs normalement attribués aux antennes défaillantes [Grangeat, Orange, Observation Sequana, 2016]
Réseau électrique de transport (HT)	Structure maillée, avec des niveaux de redondance non homogènes sur le territoire, et avec des réserves de puissance adaptables en cas de besoin	Les postes source (dits de transformation), le réseau HT de 225 kV, 90 kV ou 63 kV, dit HTB (réseaux régionaux de répartition qui alimentent les réseaux de distribution publique et les gros consommateurs industriels), le réseau HT 400 kV (réseau dit de transport, qui relie les centrales de production et les points d'interconnexions avec les autres pays) et les centrales de production.
Réseau électrique de distribution (MT et BT)	Fonction de la densité actuelle de la zone à desservir (arborescente, en coupure d'artère ou en double dérivation), elle est adaptable via les points de connexions existants	Le réseau BT, les postes de distribution, le réseau Moyenne Tension (MT) dit de distribution.

Chapitre 2 : Etat de l'art

Réseau	Structure observée	Catégories d'infrastructures
Réseau d'eau potable	Réseau primaire qui assure la redondance de la production Réseau secondaire très maillé en zone urbaine.	On distingue 7 catégories d'infrastructures : Les usines de production d'eau potable, le réseau primaire (qui connecte les usines entre elles et dessert uniquement les réservoirs principaux et les interconnexions avec les autres réseaux d'eau, avec des conduites de diamètre supérieur à 30 cm), des stations de transfert (sur les canalisations primaires, elles permettent les échanges d'eau traitée entre les différents secteurs des usines), des stations de pompage (pour alimenter les réservoirs des zones en hauteur), les réservoirs, le réseau secondaire (qui part des réservoirs, avec des diamètres de 20 à 40 cm), et les conduites locales (de diamètre 10 à 15 cm). [SEDIF a, b et c, 2016] On distingue 11 catégories d'infrastructures : les points d'import (terminaux méthaniers ou points d'interconnexion avec les pays voisins), le réseau de transport principal (à haute pression et grand diamètre, il connecte entre eux les points d'import et les stockages), des stations de compression (disposées tous les 150 km sur le réseau principal pour compenser les pertes de charge), des postes de coupure (qui permettent d'introduire et de réceptionner les pistons de nettoyage), des postes de sectionnement (pour stopper la circulation de gaz et permettre la décompression du gazoduc, pour des opérations de maintenance ou en cas d'urgence), les stockages souterrains (utilisés pour adapter les approvisionnements réguliers à la consommation saisonnière des clients finaux), les postes de livraison (qui diminuent la pression), le réseau de moyenne pression (4 bars), les postes de détenteurs (sur le réseau MP), et le réseau basse pression (qui part des postes détenteurs). Le réseau de gaz est maillé à l'échelle de la France pour le réseau de transport [CRE, gaz, 2016]. Le réseau BP est également maillé en zone urbaine avec une possibilité de reconfiguration : en cas d'inondation par exemple, l'exploitant peut fermer certains postes de détente par précaution et alimenter certains usagers non inondés via un autre poste. [Observation Sequana 17/03/2016]
Réseau de gaz	Réseau BP maillé en zone urbaine avec pour certains une possibilité de reconfiguration.	La vapeur est produite par une usine, puis utilise les canalisations, passe par des chambres de sectionnement, arrive à des sous-stations qui jouent le rôle d'échangeur avec le circuit interne des abonnés et revient par un réseau retour. [TOUBIN, 2014]
Réseau vapeur	Deux boucles : un pour la vapeur sortante, un pour le retour depuis les abonnés.	
Réseau de distribution en hydrocarbures	Linéaire jusqu'au point de livraison, malgré des points de connexion potentielle avec d'autres réseaux.	On distingue 5 catégories d'infrastructure : Les raffineries, les stations d'expédition et stations relais, les pipelines (de 25 à 80 cm de diamètre pour le réseau TRAPIL), les terminaux de livraisons, les dépôts de réception. Sur le réseau TRAPIL qui fait la liaison Le Havre Paris, même si l'on peut distinguer 2 mailles sur les 1375 km de réseau et les 2 interconnexions avec d'autres réseaux de pipelines, il n'est pas évident de parler d'un réseau maillé. En effet, le réseau transporte différents produits par vague d'acheminement et donc l'interconnexion entre les pipelines ne peut pas être systématique. [TRAPIL, 2016, carte]

Suite de la Table 4 : Structure des réseaux techniques et infrastructures principales

2.1.3 Différentes significations du terme « vulnérabilité »

Si l'on cherche dans la littérature une définition précise du terme vulnérabilité, force est de constater que ce mot prend des sens relativement différents selon le contexte, et qu'il y a une évolution sémantique de cette notion depuis son utilisation dans les années 70. Initialement, la vulnérabilité était évaluée comme le degré de perte et de dégâts dus à l'occurrence d'un aléa [Bouchon, 2006]. Elle changea de définition dans les années 80 en « degré d'exposition, [...] probabilité d'être exposé à un aléa et sensibilité de l'élément à souffrir d'une perte ou d'un dommage » [Bouchon, 2006]. Puis plusieurs courants de pensée s'opposèrent entre :

- ceux qui étudient la vulnérabilité comme un état du système avant toute apparition d'un aléa, à cause de caractéristiques intrinsèques. C'est le choix par exemple de la norme ISO 73 qui propose une définition extrêmement large : « propriété intrinsèque de quelque chose entraînant une source de risque pouvant induire une conséquence » [ISO 73, 2009]
- ceux qui voient la vulnérabilité comme la quantité potentielle de dommages sur un système, causée par un événement spécifié, et tenant compte des différentes réactions sociotechniques du système. Cette dernière définition signifierait que la notion de résilience (voir le prochain paragraphe sur la résilience) serait incluse dans la notion de vulnérabilité [Kröger, 2011, Chapitre 1].

D'autres enfin, comme Gleyze, limitent la vulnérabilité sur l'« endommagement » technique subi suite à une catastrophe définie sans s'intéresser à la réaction organisationnelle. Il distingue d'ailleurs l'endommagement matériel (associé à un impact physique direct) de l'endommagement structurel associé à une vulnérabilité structurelle, définie comme « la perte d'efficacité relationnelle du réseau », et qui découle de l'endommagement matériel [GLEYZE, 2007]. Il est à noter que la notion d'endommagement est fortement liée à la notion « d'exposition au danger » et à la capacité de protection des enjeux (sensibilité). Cette notion semble être associée à une notion de capacité passive du système et non à une réaction. Le caractère passif de la « vulnérabilité » signifie que la résilience –notion active dans l'ensemble des définitions du paragraphe suivant- ne peut pas être incluse dans la notion de vulnérabilité. La séparation de la notion d'aléa de la notion d'endommagement est d'ailleurs retenue par le Conseil Général du Développement Durable en 2013 lorsqu'il définit la vulnérabilité de l'enjeu comme une mesure de l'amplitude des effets (présence humaine, activités économiques...) face à un aléa donné [CGEDD, 2013]. Cependant, ils ne statuent pas sur l'instant où mesurer la vulnérabilité (après le choc, après les réactions du système, ou une fois l'évènement clos).

Les précédents éléments illustrent bien qu'il n'y a pas de consensus autour de la définition de « vulnérabilité » [Grangeat, CIPRNET Staff Exchange, 2014], que les notions de vulnérabilité et de résilience sont fortement liées, et que la frontière entre les deux reste floue.

Chapitre 2 : Etat de l'art

Dans le présent travail, les contraintes des différents projets de recherche nous ont incités à définir la vulnérabilité FACE à un évènement caractérisé en intensité et en localisation, et non pas une vulnérabilité comme une propriété seulement intrinsèque ou une vulnérabilité générique face à un type d'évènement. Ce qui signifie que la notion d'exposition est ici déterministe : les infrastructures sont ou ne sont pas exposées à l'évènement étudié. Puis les infrastructures sont sensibles – ou non – à l'intensité de l'évènement étudié. C'est également pour cette raison que les approches uniquement basées sur les analyses de graphe ne seront pas exposées ici : savoir quels sont les nœuds les plus importants en termes de connectivité est une approche intéressante lorsque l'on veut hiérarchiser les infrastructures d'un réseau ou lorsque l'on veut savoir quelle est la pire combinaison de défaillances d'infrastructures. Mais dans notre cas, les infrastructures impactées sont déjà définies par les scénarios qui nous ont été fournis.

Afin de mieux appréhender les processus de réaction des réseaux et de leur gestionnaire, l'auteur a choisi de séparer clairement les notions de résilience et de vulnérabilité. Après avoir discuté avec les gestionnaires de certains réseaux d'eau, il est apparu que dans le sens commun, la notion de vulnérabilité était proche de la notion de « manque de robustesse », de fragilité, et de premier « impact ». L'auteur a donc choisi la notion « d'endommagement » et de dysfonctionnement immédiat pour mesurer la vulnérabilité, c'est-à-dire l'approche de Gleyze.

Cependant, la notion d'endommagement de Gleyze est trop liée à l'aspect uniquement matériel, et le concept de dysfonctionnement n'est pas facilement quantifiable. Dans la mesure où les réseaux sont des systèmes destinés à fournir des services, qui sont contractualisés avec des seuils minimaux de performance, la vulnérabilité sera évaluée selon la perte du niveau de performance par rapport au service initial fourni. La performance évoluant dans le temps, elle peut se représenter par une courbe $P(\text{temps})$.

Il reste à définir le moment où l'on mesure cette vulnérabilité sur la courbe de performance (**Figure 7**). Le concept de vulnérabilité est associé ici à une réaction passive du système technique, due à sa structure et sa robustesse. A l'inverse, le concept de résilience est vu dans le présent travail comme une réaction active du système sociotechnique, comme le montre la section suivante. Cette distinction entre la phase passive et la phase active est expliquée par le modèle simplifié d'un réseau technique, qui sépare le système technique de la gestion du réseau, située à l'échelle du réseau d'infrastructures plutôt qu'à l'échelle de l'infrastructure (**Figure 8**).

La séparation entre la couche organisationnelle et technique n'est pas toujours pertinente lorsque l'on modélise un système sociotechnique, mais elle se justifie dans ce cas très particulier de l'étude de réseaux techniques face à une crise soudaine sur un temps court. L'auteur s'intéresse sur un temps court à une modélisation technique de la réaction du système d'infrastructures (simulateurs techniques spécifiques) face aux vulnérabilités constatées, et sur un temps long à une estimation de la réaction organisationnelle d'après les opérateurs (évaluation de la résilience, voir la section suivante). La séparation technique et

organisationnelle est donc d'abord temporelle : après un délai de l'ordre de la journée, la réaction organisationnelle devient prépondérante sur la réaction purement technique du système. Sur un temps plus court en revanche, la réaction technique programmée des réseaux face à une défaillance est bien plus rapide que le délai de mise en place d'une cellule de crise et donc du délai de prise de décision de l'organisation. De plus, concernant des réseaux techniques comme par exemple le gaz, l'électricité ou l'eau, les prises de décisions se font en fonction de l'estimation de la réaction technique du système (quelles conséquences si l'on ferme telle ou telle vanne pour contenir une fuite, etc.). Il paraît donc pertinent, sur un temps court, d'approcher l'évolution de la performance des réseaux techniques par des simulateurs spécifiques en connaissant les vulnérabilités de chaque infrastructure.

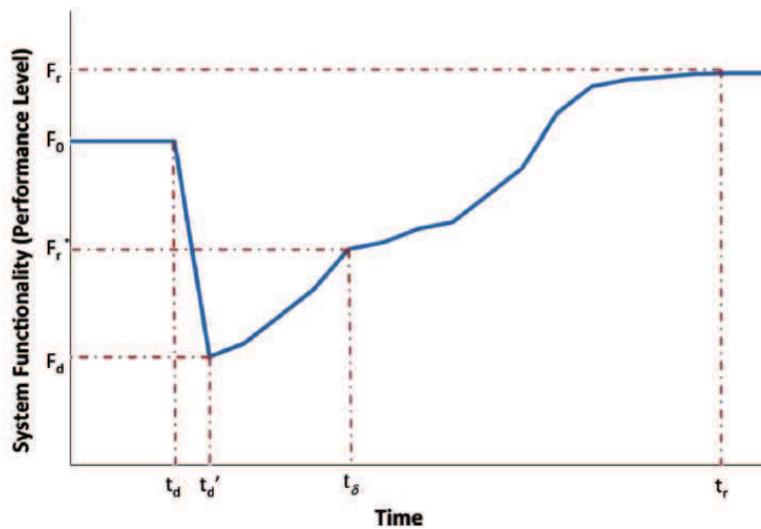


Figure 7 : Courbe de performance illustrative. Le temps t_a correspond à un évènement brutal, t_r correspond à la phase où le système a intégré le retour d'expérience et s'est amélioré [Francis, 2014]

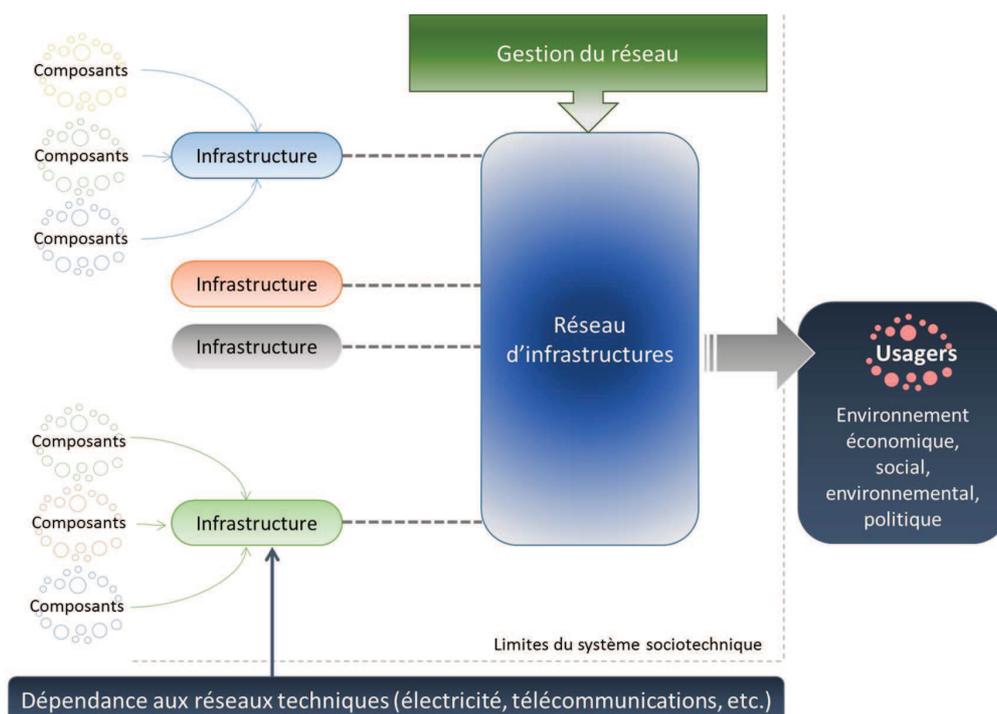


Figure 8 : Découpe artificielle du système sociotechnique

La vulnérabilité est définie dans ce travail comme la perte de performance (ou de niveau de service) mesurée à la fin de la période de réaction passive du système [Grangeat, 2016, f]. Cependant le délai de « réaction passive » est lui déterminé par le délai nécessaire au système sociotechnique pour mettre en œuvre les premières mesures palliatives à la crise, donc par une partie de ses capacités de résilience (voir le paragraphe suivant pour la définition complète de « résilience »). La vulnérabilité n'est alors pas l'opposé de la résilience, comme le prétendaient de nombreux travaux dont ceux de Yazdani [Yazdani, 2011], mais bien une notion complémentaire, dont le sens respecte le sens commun : il faut bien chercher à diminuer sa vulnérabilité et augmenter sa résilience, c'est-à-dire diminuer sa perte de service et réduire, entre autres, le temps de mise en œuvre des premières réactions.

Les réseaux sont des systèmes techniques qui peuvent être analysés à l'échelle de l'infrastructure et à l'échelle du système. Ce travail propose une approche inductive de la vulnérabilité (bottom-up approach) : l'étude de la vulnérabilité de chaque infrastructure face à un événement doit permettre de reconstruire un indice global de la vulnérabilité du système. De plus ce travail s'intéresse à une analyse systémique du système, c'est-à-dire qu'il exploite le degré de fonctionnement résiduel de chaque infrastructure et du système après l'évènement, et non pas seulement son degré d'endommagement. En effet une infrastructure peut être touchée, endommagée, mais être capable de maintenir un niveau de service minimum via l'existence pré-événement de solutions de redondance par exemple. Cette approche se distingue donc d'une analyse purement analytique du système technique, qui se serait arrêtée au niveau d'endommagement du système technique [Lhomme, 2012].

Chapitre 2 : Etat de l'art

Enfin, il faut distinguer deux temps caractéristiques de vulnérabilité qui correspondent aux deux échelles d'analyse du réseau technique : la perte de service de chaque infrastructure immédiate après l'évènement, et la perte de service générale du système. Cette dernière a une évolution temporelle entre le t_0 de l'évènement et le délai de réaction active du système. Cette évolution est calculée par des simulateurs spécifiques au réseau, et traduit la propagation de la perturbation à l'ensemble du système technique, même aux infrastructures non touchées initialement. La vulnérabilité à l'échelle du système, mesurée à la fin de la période passive de réaction, prend donc en compte les cascades de dysfonctionnements internes au réseau. La distinction entre ces deux échelles de vulnérabilité est d'ailleurs faite par le CGEDD lorsqu'il affirme que « les mesures et travaux de réduction de la vulnérabilité concernent principalement les vulnérabilités physiques ET systémiques. » [CGEDD, 2013]

La Commission Européenne distingue deux causes de dysfonctionnement d'une infrastructure dans sa définition de la vulnérabilité : « une caractéristique d'un élément de design de l'infrastructure, d'implémentation ou d'opération, qui la rend sensible à l'interruption de service OU à sa destruction par un danger, et qui inclut ses dépendances au fonctionnement d'autres infrastructures. » [EUCOM, 2006,] On obtient alors deux types de vulnérabilité immédiate : la vulnérabilité physique à un danger, et la vulnérabilité à la rupture des services support dont elle dépend. L'auteur parlera alors de vulnérabilité fonctionnelle lorsqu'une infrastructure est sensible à la perte de l'approvisionnement électrique, ou de tout autre réseau technique. Le terme « fonctionnel » est repris à « l'analyse fonctionnelle » d'une infrastructure, qui consiste entre autres à identifier tous les flux entrants, supports et de contrôle dont l'infrastructure a besoin pour fonctionner. Adachi a mis en évidence l'intérêt de séparer ces deux types de vulnérabilités [Adachi, 2008]. Il s'est intéressé à la vulnérabilité des infrastructures d'un réseau d'eau du Shelby County (USA) face à un tremblement de terre : a) sans considérer la dépendance de certaines infrastructures au réseau électrique, b) en considérant les dommages causés par le tremblement de terre au réseau électrique, et donc en simulant la rupture du service électrique, et c) en considérant la possibilité pour certaines infrastructures d'utiliser un générateur de secours. Chaque infrastructure du réseau d'eau (y compris les canalisations) et les infrastructures de distribution du réseau électrique possédait sa courbe de fragilité face à un tremblement de terre. La probabilité de dysfonctionnement de chaque infrastructure résultait alors d'une combinaison entre la probabilité d'être physiquement endommagée, la probabilité d'avoir une coupure électrique et la probabilité que le générateur ne fonctionne pas. Puis Adachi a réalisé à l'aide du modèle développé une simulation statistique de type « Monte Carlo » d'un tremblement de terre. Les résultats présentés pour chaque infrastructure démontrent l'écart de probabilité de dysfonctionnement selon que l'on prenne en compte ou non la vulnérabilité fonctionnelle. Il prouve ainsi scientifiquement la nécessité d'inclure dans le terme de vulnérabilité à la fois les dommages directs et les dommages liés à la rupture des services support dont l'infrastructure étudiée dépend.

En conclusion, il n'existe pas de consensus autour de la définition du terme « vulnérabilité ». Ce travail choisit de la définir face à un aléa donné, caractérisé en intensité et en localisation. Il ne s'intéresse pas aux dommages en eux-mêmes mais surtout à la perte de niveau de service

engendré par une vulnérabilité physique (dommages) et une vulnérabilité fonctionnelle (vis-à-vis de la perte de service des autres réseaux dont il est dépendant). On est donc bien dans une analyse systémique des réseaux techniques, fondée sur des analyses locales. La vulnérabilité est vue comme une capacité passive du système technique qui s'étudie à deux niveaux : celui de l'infrastructure, et celui du système. La vulnérabilité systémique peut alors être calculée à l'aide de l'évolution temporelle de la performance du système, compte-tenu des vulnérabilités physiques et fonctionnelles des infrastructures touchées par l'aléa (approche inductive) et de la propagation interne des défaillances de service dans le système. La vulnérabilité systémique est mesurée sur cette courbe de performance à la fin de la période de réaction passive du système, qui correspond au délai de mise en place des premières réactions du système sociotechnique. On obtient alors une notion de vulnérabilité qui est complémentaire à la notion de résilience telle qu'elle est définie dans la section suivante.

2.1.4 Concepts de résilience

Alors que la vulnérabilité est plutôt centrée sur le système technique du réseau, la résilience est une notion qui implique une réaction, donc l'étude du système sociotechnique (les infrastructures et la couche organisationnelle). De très nombreuses définitions existent autour de la résilience, mot popularisé par la conférence de Hyogo et le programme d'action des Nations Unies [United Nations, 2012]. Hollnagel distingue deux approches de celle-ci [Hollnagel, 2009]. La première présente une organisation résiliente comme une organisation à haute fiabilité, c'est-à-dire capable d'éviter les crises grâce à une grande « qualité de fonctionnement » [Leplat, 2007]. La seconde vision analyse les systèmes face à des accidents majeurs, afin de comprendre les failles des organisations. Seule cette deuxième approche intéresse ce travail au vu des contraintes des différents projets. L'état de l'art qui suit est donc centré sur la définition d'une résilience FACE à un événement donné.

Bruneau fait figure de référence lorsque l'on parle du concept de résilience. Il propose de définir la résilience d'une communauté face au risque sismique à l'aide de quatre dimensions [Bruneau, 2003] :

- la robustesse : capacité des bâtiments à faire face à un certain niveau d'intensité, sans perte de fonctionnalité ;
- la redondance des systèmes, c'est-à-dire leur capacité à être facilement substituables ;
- des ressources adaptées (moyens humains, matériels et structures), c'est-à-dire la capacité de la société à identifier des problèmes, établir des priorités, mobiliser des moyens en vue d'un but déterminé ;
- la rapidité, c'est-à-dire la capacité à hiérarchiser et à atteindre les objectifs fixés dans le temps imparti pour limiter les endommagements.

Cependant la notion de rapidité paraît correspondre au résultat des trois premières caractéristiques : la capacité à hiérarchiser et à atteindre ses objectifs est influencée par le dimensionnement des ressources disponibles, la redondance des systèmes et le taux de dommage aux infrastructures. De plus, l'évaluation de la résilience d'une communauté n'est pas entièrement transposable à l'évaluation de la résilience des systèmes sociotechniques que

Chapitre 2 : Etat de l'art

sont les réseaux techniques. D'autres définitions, plus spécifiques à ces systèmes, peuvent être mises en parallèles à la définition de Bruneau.

Woods distingue dans la littérature quatre concepts de résilience : La résilience comme un retour à l'équilibre après un traumatisme, la résilience comme synonyme de résistance, la résilience comme capacité d'extension de ses performances à un environnement changeant et la résilience comme capacité d'adaptation face aux surprises, cette dernière étant basée sur l'architecture du système (redondance notamment) [Woods, 2015]. Si certaines de ces catégories croisent bien la définition de Bruneau, elles semblent traduire des choix d'auteurs qui ne constituent pas un consensus autour du terme de résilience.

Reghezza propose alors d'expliquer la cohérence entre les catégories de résilience face au risque, en les distinguant par l'instant auquel la résilience est mesurée [Reghezza, 2013].

- Au moment de l'impact, la résilience est perçue comme une capacité à résister au choc, c'est-à-dire qu'elle s'oppose à la vulnérabilité du système.
- Après la déstabilisation, dans une phase d'urgence, la résilience « s'entend comme capacité à se maintenir malgré le choc, à l'absorber et à revenir à l'état d'équilibre » [Reghezza, 2013]. Elle se définit comme la capacité à maintenir ses fonctions stratégiques, même dans un état dégradé et à restaurer rapidement le système perturbé vers un état stable.
- Sur un temps plus long, la résilience correspond à la capacité de récupération du système, qui couvre autant la reconstruction matérielle que la reconstruction des échanges socio-économiques.

Ces trois périodes peuvent d'ailleurs être mises en perspective avec la définition du CGEDD des trois phases de retour à la normale.

- Les phases de diagnostic et de sécurisation, qui correspondent à l'évaluation de la capacité d'absorption effective face à l'aléa.
- La phase de rétablissement provisoire des services (définie comme « frontière de la crise et de l'après-crise. Les réparations provisoires concernent souvent le rétablissement d'un service et non celui des infrastructures »).
- La phase de réparation définitive où le « préfet n'y voit plus matière à « action de crise » transversale appelant sa coordination, ferme le centre de crise et les acteurs agissent désormais sans coordination » [CGEDD, 2016]

Dans la littérature scientifique, Francis et Lhomme confirment l'intérêt des trois temps caractéristiques de Reghezza lorsque l'on parle de résilience. En effet, ces deux auteurs associent à chacune de ces phases une capacité propre de la résilience. Lhomme propose, de son côté, d'analyser la résilience des réseaux techniques sur la base des trois capacités suivantes :

- la capacité de résistance, déterminée par les endommagements matériels consécutifs à un scénario donné ;
- la capacité d'absorption, capacité à fonctionner en dépit d'évènements perturbateurs ;

Chapitre 2 : Etat de l'art

- et la capacité de récupération, capacité à remettre en service des composants défectueux [Lhomme, 2012].

Francis [Francis, 2014] a, quant à lui, retenu trois capacités légèrement différentes, sur la base de la comparaison de 25 définitions de la « résilience », en fonction de leur contexte d'emploi (système organisationnel, système socio-écologique, système économique, système social, système d'infrastructures). Celles-ci sont présentées ci-dessous et sur la **Figure 9** [Francis, 2014].

- La capacité d'absorption : il s'agit de « l'intensité des perturbations que le système peut absorber avec peu d'efforts en ayant peu de conséquences ». On peut rapprocher cette définition de la notion de robustesse, de résistance et de redondance. Dans tous les cas il s'agit d'une capacité relativement « passive » du système.
- La capacité d'adaptation du système : il s'agit de la « capacité d'un système à s'adapter à des situations indésirables en se modifiant si la capacité d'absorption a été dépassée » Cette capacité est améliorée par la « capacité à anticiper les événements perturbateurs, reconnaître les événements non anticipés, se réorganiser après un événement et plus généralement être préparé ». On est là dans une réponse active du système face à une situation de crise ou en anticipation de celle-ci.
- La capacité de récupération : elle est caractérisée par « la rapidité de retour à la normale ou à un niveau de service meilleur que l'initial ou bien par une fiabilité améliorée du système. Cette capacité est à évaluer selon les niveaux de service désirés ». On est là dans la troisième phase de Reghezza : le retour à la normale, dont la rapidité est un critère principal.

Il est à noter que la « capacité » est définie dans ce travail à la fois comme la connaissance d'un processus, de ses contraintes et de ses limites, et en même temps comme le pouvoir (l'autorité et les moyens nécessaires) de mettre en œuvre des actions [Petit Robert, 2013].

Les capacités de Francis sont définies par la notion de performance. Ce n'est pas le seul moyen d'évaluer la résilience. Gargiulo souligne qu'il existe plusieurs approches pour mesurer ces capacités, notamment celles basées sur l'évaluation de la performance ou celles basées sur des évaluations subjectives de critères identifiés [Gargiulo, 2016]. Cette dernière est utilisée par Robert notamment. Selon lui, les questionnaires de risques dans ces systèmes sociotechniques se sont concentrés longtemps sur la protection des infrastructures critiques avant d'évoluer vers le concept de « résilience » [Robert, 2013, b]. L'ancienne notion de « protection » était basée sur l'existence des trois critères suivants :

- L'acceptation du risque, c'est-à-dire la compréhension de l'environnement de l'infrastructure, la définition d'un niveau acceptable de perturbation par infrastructure,
- La planification de la réponse à l'aléa, c'est-à-dire les activités de prévention et de préparation, les actions de mitigation à mettre en place,
- L'anticipation de l'aléa, c'est-à-dire l'ensemble des actions qui permettent de reconnaître les changements internes et externes qui pourraient causer une perturbation de fonctionnement.

Chapitre 2 : Etat de l'art

Ce dernier point nécessite donc de connaître les niveaux de sensibilité de l'infrastructure aux différentes situations. La résilience viendrait dans la continuité de ces principes, en assurant leur cohérence, via la notion de connaissance de ces seuils, des processus de réaction de l'entreprise et des rôles des différents acteurs mobilisés. La résilience devient là encore une capacité, mesurée comme résultat des critères précédents : « la capacité d'un système à maintenir ou à retrouver un niveau acceptable de fonctionnement malgré les perturbations » [Robert, 2013, b].

En dehors de la littérature scientifique, le CGEDD a, lui, défini en 2016 la résilience à l'aide de la théorie des organisations comme « la capacité d'un système à absorber une perturbation, à se réorganiser, et à continuer de fonctionner de la même manière qu'avant. La résilience concerne en général le réseau mais aussi, dans le cadre du retour à la normale, celle du service auquel participe ce réseau. » La notion de retour à la normale est alors définie comme « le retour à la situation qui prévalait antérieurement à la crise ou à une situation procurant à la population un niveau de service au moins équivalent ou, à défaut, un niveau de service pouvant être considéré comme acceptable » [CGEDD, 2016]. La notion de « niveau de service » réfère alors à la mesure de la résilience par une mesure de performance. Le CGEDD s'appuie pour sa définition sur la norme ISO 73, qui définit de façon évasive la résilience comme « capacité d'adaptation d'un organisme dans un environnement complexe et changeant ».

En conclusion, il n'existe pas de consensus autour de la définition de résilience, à part le fait qu'il s'agisse d'une ou de plusieurs « capacités ». Il revient donc à chaque auteur de définir clairement sa position. La cohérence entre le découpage temporel de Reghezza des différentes catégories de résilience et les capacités identifiées par Lhomme et Francis ont poussé l'auteur à définir la résilience des réseaux techniques, en tant que systèmes sociotechniques, comme un ensemble de trois capacités : la capacité d'absorption, celle d'adaptation et celle de récupération. Dans la mesure où l'auteur s'intéresse à des situations de crise, donc à des situations de rupture de service des réseaux techniques, la résilience sera préférentiellement évaluée par la notion de performance. Néanmoins, dans les cas où les résultats de simulation de cette performance seraient trop incertains, il faudrait estimer la performance attendue face à un événement sur la base de l'existence de critères de résilience (existence de plan de prévention, moyens d'anticipation, etc.) correspondant aux trois capacités précédentes.

La résilience d'un réseau technique se définit alors comme la capacité à absorber un choc, à s'adapter face à celui-ci et à restaurer sa performance contractuelle dans un délai acceptable. Ces trois capacités correspondent à des phases de la crise : l'absorption correspond à la réaction passive du système, liée à sa structure, l'adaptation correspond à la réaction active du système pour gérer la crise et mettre en place des solutions palliatives temporaires, puis la capacité de récupération, correspond à la mise en œuvre de solutions durables pour atteindre le « retour à la normale ». Ces trois phases sont présentées sur la figure ci-dessous. Il est alors intéressant de noter que la capacité d'absorption du système, dans sa dimension passive liée à la structure du système, correspond ici à l'opposé de la définition de « vulnérabilité » telle que

choisie dans le paragraphe précédent : « perte de performance du système mesurée à la fin de la réaction passive de celui-ci face à un aléa caractérisé ».

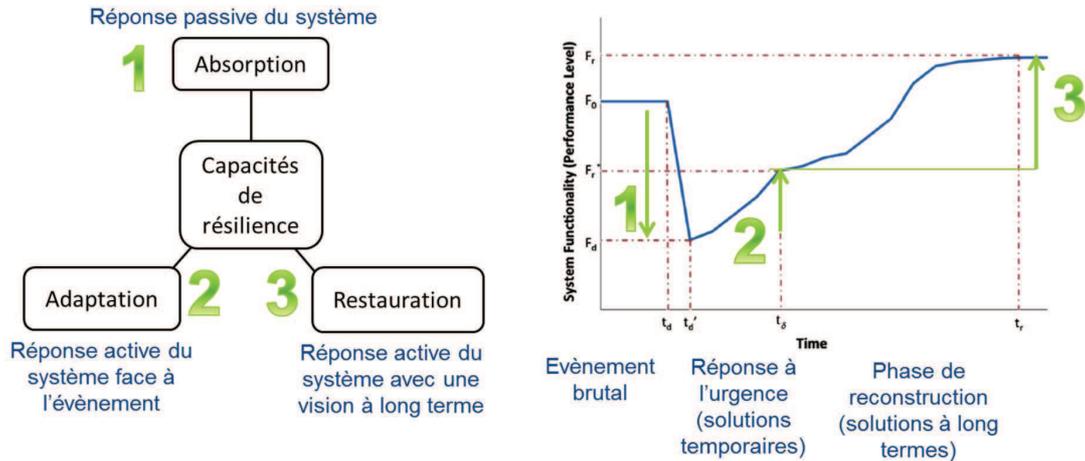


Figure 9 : Les trois phases de la résilience et leur signification sur la courbe de performance [Francis, 2014]

2.1.5 Dépendances, interdépendances et effets cascade

Rinaldi a écrit en 2001 un article qui fait depuis référence lorsque l'on définit ces termes [Rinaldi, 2001]. La dépendance y est décrite comme « un lien ou une connexion entre deux infrastructures, à travers lequel l'état de l'une influence ou est corrélée à l'état de l'autre ». Lorsque cette relation de dépendance est bidirectionnelle, on parle d'interdépendance.

Il existe plusieurs typologies de dépendances. Zimmerman [Zimmerman, 2002] postule pour les réseaux que « les interconnexions entre les infrastructures peuvent être spatiales ou fonctionnelles ». Elles sont « spatiales » dans la mesure où, dans les villes, les infrastructures devenant de plus en plus denses, elles empruntent les mêmes conduites, ce qui peut faire augmenter le risque de rupture. Elles sont fonctionnelles dans la mesure où les systèmes peuvent être dépendants les uns des autres au niveau opérationnel, un système en activant un autre. » Rey définit une interaction comme la « mise en mouvement de catégories de ressources » sur la base du classement réalisé par [Robert, 2007] :

- « quantité et qualité de matière/énergie/bien,
- disponibilité, mobilité et compétence pour la ressource humaine,
- d'authenticité, confidentialité, intégrité, disponibilité, débit de transfert et temps d'attente pour les ressources de données, » [Rey, 2015]
- ressource financière/ assurance,
- service.

Par ailleurs, Rinaldi propose une typologie en quatre classes de dépendances [Rinaldi, 2001] :

- physique : lorsque l'état d'une infrastructure est dépendant de la fourniture d'une ressource produite par une autre infrastructure.

- géographique : lorsqu'elle est relative à la proximité des infrastructures, c'est-à-dire qu'un évènement localisé peut créer un changement d'état sur toutes les infrastructures proches.
- cybernétique : lorsque l'état d'une infrastructure dépend de la transmission d'une information d'une autre infrastructure, via un réseau de communication.
- logique : lorsque l'état de l'une influence ou est corrélé à l'état de l'autre par des liens qui n'appartiennent pas aux trois autres catégories.

Dutozia [Dutozia, 2013] complète cette liste de dépendances par l'existence de liens « politiques ou de gouvernance », ou encore de liens « sociétaux » qui peuvent être inclus dans la catégorie « dépendance logique » de Rinaldi. On peut également penser aux liens économiques entre les réseaux. Cependant Zimmerman souligne que « les interdépendances se produisent à différents niveaux d'organisation du système » [Zimmerman, 2002]. Ainsi les trois premières dépendances identifiées par Rinaldi se situent-elles plutôt au niveau de l'infrastructure, quand les liens de gouvernance ou les liens économiques se situent plutôt à l'échelle du système réseau entier.

Les liens de dépendance sont nécessaires pour qu'il y ait un effet cascade. Celui-ci est défini comme « la défaillance d'une infrastructure qui cause la défaillance d'un élément d'une seconde infrastructure, provoquant ainsi sa défaillance » [Rinaldi, 2001]. Michel-Kerjan [Michel-Kerjan, 2002] distingue les effets cascade internes, entre les infrastructures d'un réseau donné, et externes lorsqu'ils touchent un autre réseau que celui initialement impacté. Il faut également différencier les effets cascade et les effets escalade. Ces derniers concernent une conjonction de plusieurs effets cascade sur une infrastructure, aggravant sa défaillance et son temps de réparation [Rinaldi, 2001 et Rey, 2015].

En conclusion, ce travail retiendra principalement les dépendances physiques, cybernétiques et géographiques à l'échelle des infrastructures. En effet les dépendances organisationnelles (logiques) ne pouvant pas être appréhendées sur la base des descriptions des infrastructures ; elles doivent être spécifiées opérateur par opérateur et tombent en dehors des limites de cette étude. Les dépendances cybernétiques sont essentielles, mais nécessitent de connaître à l'échelle de l'infrastructure la connexion ou non à des réseaux spécifiques de communication – information non accessible dans le cadre de cette thèse. Ce choix d'analyser uniquement certains types de dépendance (celles géographiques et celles physiques, en les nommant dépendances fonctionnelles) a déjà été fait lors du travail de thèse de M. Toubin [Toubin, 2014] avec succès au vu de l'impact de celui-ci chez les opérateurs et la mairie de Paris.

2.2 Outils existants pour modéliser les effets cascade entre réseaux techniques

L'introduction au présent travail a justifié l'intérêt d'étudier les effets cascade pour la planification et la gestion de crise et la section de définition des termes a apporté des éléments de compréhension nécessaires pour aborder cette section. Il s'agit maintenant de classer et de présenter les approches de modélisation des effets cascade existantes dans la littérature.

2.2.1 Critères opérationnels de sélection des outils de modélisation

Les gestionnaires de crise à la sécurité civile sont conscients des enjeux autour de la modélisation des effets cascades. L'étude en particulier des réseaux techniques peut se justifier par le fait que ceux-ci sont étendus et donc largement exposés à diverses agressions, en plus de leur capacité à aggraver la situation dans un temps relativement court. Outre cet intérêt avéré, il est nécessaire de comprendre les défis et questions qui entourent la mise en place ou l'utilisation d'un outil de modélisation des effets cascade pour cette institution.

Les réseaux techniques sont des systèmes de systèmes, reliés entre eux par de nombreux types de dépendances. Afin de mieux cibler l'outil de modélisation des effets cascade, seules les dépendances physiques, géographiques et cybernétiques sont prises en compte, car elles véhiculent très rapidement des défaillances techniques. Se focaliser sur les précédentes dépendances signifie que l'on met de côté les liens institutionnels, politiques et économiques. En effet les interactions organisationnelles prennent de l'importance sur des délais de l'ordre de plusieurs journées, alors que les interactions plus « techniques » ont des impacts de l'ordre de l'heure, voire moins pour les réseaux électriques. Les outils choisis sont donc valables pour des simulations de l'ordre de plusieurs heures, pas pour des simulations de l'ordre de la semaine. De plus, même si ces outils se concentrent sur les aspects techniques, les indicateurs d'aide à la décision qui en résultent doivent être bien plus variés. En effet, le gestionnaire de crise prend en compte les victimes humaines, les critères sociaux, les conséquences économiques, environnementales ou encore les conséquences sur les institutions publiques. Enfin, le résultat de la simulation doit au moins être transcrit à la granularité de l'infrastructure et représenté sur une carte, afin que les opérateurs puissent engager des actions en réponse à la situation. Cela signifie que les indicateurs globaux comme « la perte de telle infrastructure signifie une perte globale de X % du service global » ne peuvent pas être interprétés en indicateurs d'aide à la planification ou à la gestion de crise. Ils sont utiles aux comparaisons de scénarios, mais pas à l'aide à l'engagement de ressources.

Un gestionnaire de crise est en charge d'un territoire limité, qui va probablement conditionner l'espace modélisé dans l'outil. Cela signifie que les scénarios dont la cause provient de l'extérieur de ce territoire ne sont pas forcément modélisable, et il est important de souligner cette limite.

Posséder un outil de simulation signifie également dégager une ligne budgétaire pour sa maintenance et pour la mise à jour de la base de données associée. Certains outils sont peu flexibles et utilisent alors seulement les données nécessaires à certains scénarios craints sur une partie du territoire. D'autres outils ont fait le choix de la flexibilité et impliquent donc d'entretenir une base de données exhaustive sur un territoire étendu afin de couvrir les scénarios imprévus. Ce choix est à réfléchir pour les gestionnaires de crise en fonction des besoins réels. De façon générale, la collecte de données utilisées dans les outils présentés ci-après a été accompagnée par un accord de partage, dans le cadre de partenariats publics privés.

Enfin, deux utilisations sont à distinguer dans la modélisation des effets cascades. La modélisation de séquences longues de défaillances est utile pour créer des scénarios

d'entraînement, et permettre de confronter les plans de réaction à ces effets souvent non pris en compte (planification). Mais une modélisation de plusieurs jours ne peut avoir valeur d'aide à la décision en situation de crise, car elle n'intègre pas dans le modèle les pressions politiques et économiques. La modélisation d'effets cascade comme aide à la gestion de crise ne peut être vue que sur des simulations courtes (quelques heures) où la dynamique de propagation des défaillances est encore prédominée par les contraintes techniques.

Les outils présentés ci-dessous ont été sélectionnés sur la base de deux critères. La première contrainte est que cet outil ait déjà été utilisé sur des données réelles, à l'échelle d'une ville. De nombreuses méthodes n'ont pas pu être testées sur données réelles, et cela pose un problème de crédibilité face aux gestionnaires de crise sur leur aspect pratique. Pour mieux comprendre les différentes méthodes théoriques non abordées ici, l'auteur recommande les références [Eusgeld, 2008], [Yusta, 2011] et [Ouyang, 2014]. La deuxième contrainte correspond au besoin de simuler les effets cascade entre réseaux techniques à l'échelle de l'infrastructure avec au minimum des dépendances physiques.

Les outils existants s'appuient sur deux approches complémentaires : les approches explicite et implicite correspondent à deux façons d'aborder la question de l'acquisition des données nécessaires à une simulation. L'acquisition de données est un des défis qui empêchent l'utilisation pratique de nombreuses méthodologies. En effet plus le modèle souhaité est précis, plus il nécessite un grand nombre de données techniques pour fonctionner, être calibré puis validé (curseur à positionner à droite de la **Figure 10**). Or les données des opérateurs possèdent un poids économique et juridique qui freine le partage de celles-ci avec la sécurité civile. A l'inverse, un curseur positionné à gauche de la **Figure 10** correspond à des données très générales, peu utiles pour la sécurité civile. [Grangeat, 2015, e, f]

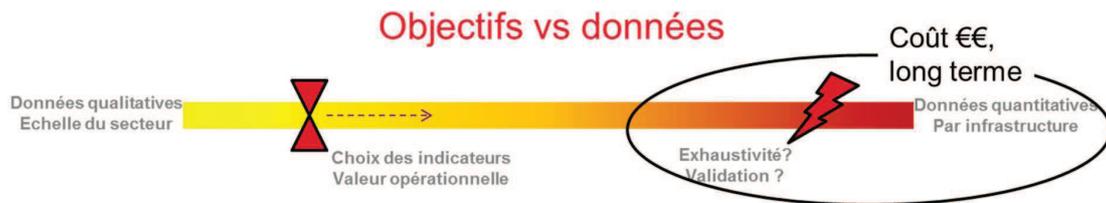


Figure 10 : Comparaison des objectifs et des données

Pour obtenir un modèle précis à l'échelle de l'infrastructure des effets cascade, certains auteurs ont choisi de décrire de façon explicite le fonctionnement interne de chaque réseau, à l'aide de simulateurs spécifiques aux réseaux, pour simuler les flux échangés entre les infrastructures d'un même réseau. Il s'agit d'une approche partant du particulier pour en déduire le comportement général de chaque réseau, puis du système de réseau (**Figure 11**). C'est donc une approche inductive [Zwingelstein, 2014] (approche *bottom-up*). A l'inverse, d'autres ont choisi de décrire les infrastructures comme une boîte noire dont les besoins extérieurs sont connus sans pour autant connaître le fonctionnement interne. Il s'agit d'une approche basée sur des données agrégées à l'échelle de l'infrastructure, que l'on appellera

méthode implicite (**Figure 12**). Cette méthode a l'avantage de nécessiter peu de données. Mais elle présente l'inconvénient d'être peu flexible face aux différents scénarios. Elle n'est pas « déductive » car elle ne correspond pas à une approche partant du général vers le particulier [Zwingelstein, 2014] ce qui serait une approche *top-down*.

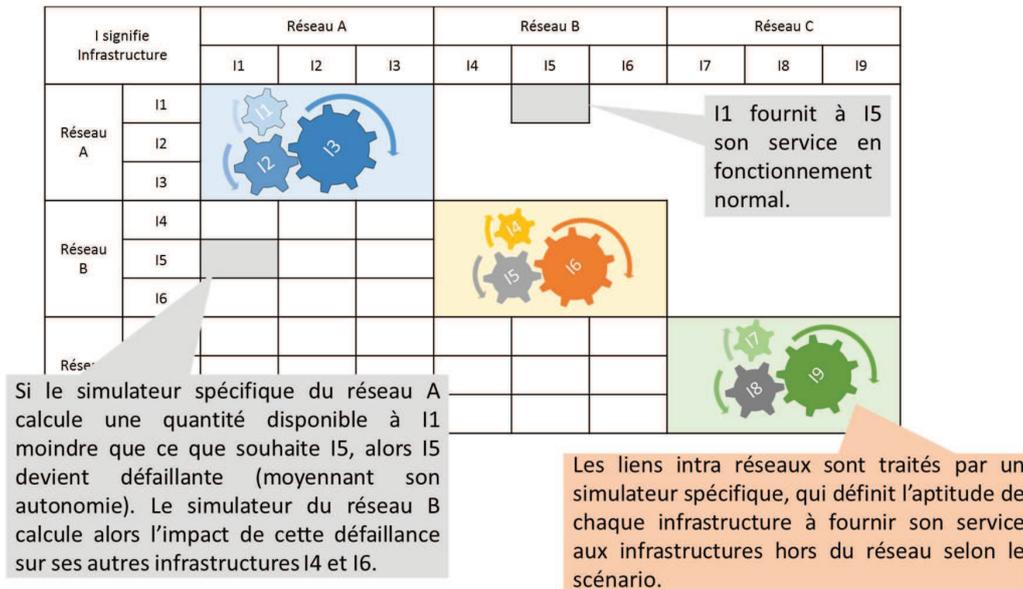


Figure 11 : Schématisation des outils de modélisation d'effets cascade ayant un fonctionnement explicite

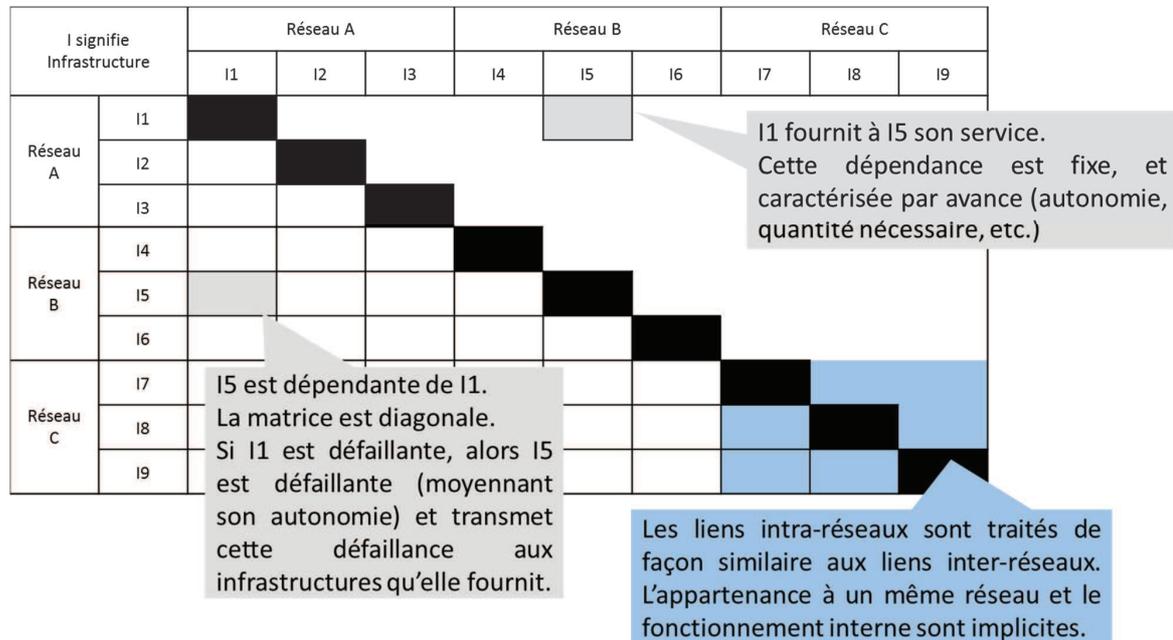


Figure 12 : Schématisation des outils de modélisation d'effets cascade ayant un fonctionnement implicite

L'état de l'art exposé ici a fait l'objet d'une publication à la conférence CRITIS 2015 (Berlin) [Grangeat, 2015, g, h], puis a donné lieu à un article actualisé dans une édition spéciale du Journal Of Critical Infrastructure Protection, suite à une invitation à la conférence EUCONCIP 2016 [Grangeat, 2016, c, d].

2.2.2 Description des outils de modélisation des effets cascade retenus dans l'approche implicite

L'approche implicite nécessite une collaboration avec les opérateurs car ce sont eux qui connaissent les particularités de chaque infrastructure. Pour que cela soit possible, il faut également que les opérateurs voient un intérêt à cette collaboration. Au moins un outil et un travail de thèse ont réussi à relever cette difficulté : l'outil DOMINO du Centre Risque & Performance (Canada) et le travail de thèse de Marie Toubin, même si ce dernier reste à l'échelle du service urbain pour sa démarche d'obtention des données, et se concentre sur un seul scénario.

DOMINO : Domino est une plateforme web sécurisée en cours d'implémentation dans les locaux de la sécurité civile de Montréal (Canada). Elle a été développée par le Centre Risque & Performance (CRP) de Polytechnique Montréal. Chaque gestionnaire d'infrastructure critique remplit un questionnaire sur son autonomie en cas de défaillance d'un service fourni par un réseau technique, ainsi que ses besoins en ressources alternatives pour continuer à fonctionner en mode dégradé. A chaque infrastructure est associée une zone de service qui, en cas de défaillance de l'infrastructure, n'aurait plus accès aux services produits par celle-ci (équivalent de l'approche par conséquences proposée par le guide ORSEC RétaP'Réseaux). DOMINO met ainsi en évidence les scénarios d'effets cascade entre infrastructures sans détailler le fonctionnement de celles-ci. Les opérateurs sont intéressés par cet outil car il constitue un outil de veille et d'alerte en cas d'évènements, et car il permet d'améliorer leurs capacités de continuité d'activité [CRP, 2015] [Robert, 2013] [Robert, 2015]. Afin de protéger les données sur la localisation des infrastructures des réseaux, le territoire de Montréal est maillé grossièrement et une infrastructure est localisée seulement par sa maille d'implantation. Le type de résultat obtenu est présenté sur la **Figure 13** ci-dessous. On peut cependant reprocher que les « zones de services » sont, à notre connaissance, statiques et indépendantes du contexte.

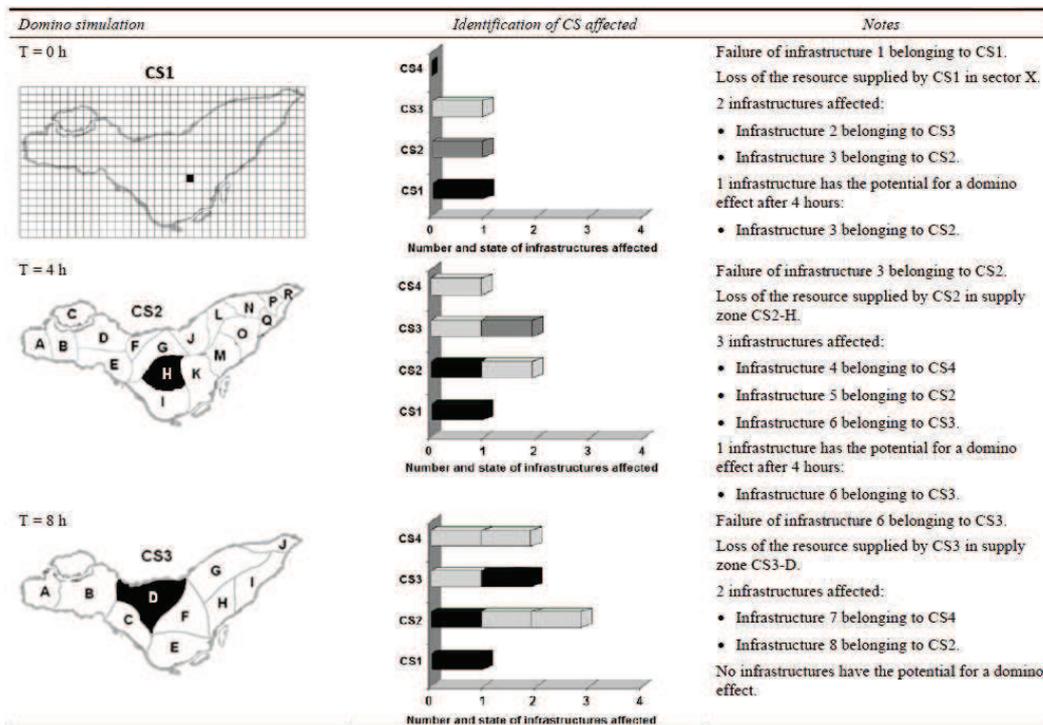


Figure 13 : Résultat de simulation avec l'outil DOMINO du CRP. A chaque infrastructure de chaque réseau est associée une zone d'impact spécifique [Robert, 2013]

Travail de thèse de Marie Toubin :

Marie Toubin a réalisé un travail d'enquête auprès notamment des opérateurs de réseaux techniques (services urbains) concernés par le scénario de la crue centennale à Paris. Elle a demandé à chaque opérateur de service urbain d'évaluer globalement ses liens de dépendance au fonctionnement des autres réseaux, l'importance de ces liens, l'autonomie de ses services en cas de défaillance d'un réseau. Ces enquêtes ont permis de dresser des portraits sectoriels des besoins et d'identifier les services urbains centraux dans le fonctionnement de la ville. Cependant cette échelle d'analyse est trop générale pour vérifier la cohérence des plans de secours. Elle a donc réalisé une seconde échelle d'analyse, à un niveau plus fin : celui des réactions prévues dans les plans d'urgence. A travers de nombreuses réunions entre les opérateurs, elle a relevé les réactions prévues jour après jour dans le scénario de la crue centennale de la Seine, et a comparé manuellement la cohérence de ces réactions à l'échelle microscopique. Par exemple, tel opérateur souhaite accéder au deuxième jour du scénario à son équipement situé en bordure de Seine. Or, celui-ci n'est pas accessible car les services de la mairie ont mis en place de façon préventive les batardeaux. Il y a alors une incohérence de réaction [Toubin, 2014].

Ce travail s'est intéressé à deux échelles d'analyse : une analyse globale des dépendances, et une analyse fine de la cohérence des réactions. Il ne correspond donc pas exactement à une simulation au niveau de l'infrastructure des dépendances entre réseaux techniques. Cependant, l'analyse de cohérence correspond à un des objectifs de modélisation des effets cascade. A ce titre, la démarche a été assimilée à un outil. De plus, il est focalisé sur un seul

scénario, ce qui autorise une analyse peu automatisée, contrairement aux autres outils qui sont multi-scénarios. Enfin, le travail de Toubin a mené à la création d'un groupe de travail propice à une approche implicite sur le territoire parisien.

2.2.3 Description des outils de modélisation des effets cascade retenus dans l'approche explicite

L'approche explicite repose sur une modélisation de la propagation des défaillances au sein de chaque réseau, définissant les infrastructures qui vont à leur tour arrêter leur fonctionnement, et de la propagation externe de ces infrastructures défaillantes sur les infrastructures des autres réseaux simulés. L'utilisation de simulateurs pour chaque réseau contraint bien souvent la modélisation aux seules dépendances physiques pré-identifiées. Cinq outils abordent de façon différente cette problématique : CISIApro, I2SIM, DIESIS, FloodResilienCity et CIPRNet. CISIApro a une approche mixte implicite et explicite. Il est présenté dans cette section car il a au moins un simulateur explicite dans son modèle. Un sixième outil, CIPMA, est présenté par la suite. Les informations peu nombreuses sur son fonctionnement (outil développé par le gouvernement australien) empêchent de le classer distinctement dans l'approche explicite.

CISIApro : Critical Infrastructure Simulation by Interdependent Agents est une plateforme italienne de simulation qui a choisi une approche mixte entre l'approche explicite, que les développeurs de CISIApro qualifient d'holistique, et l'approche implicite, qu'ils qualifient de réductionniste. Ce choix est justifié par la volonté de diminuer les données nécessaires à un modèle explicite, tout en n'étant pas contraint par une approche implicite où chaque infrastructure a ses propres limites, fonctions et caractéristiques. Chaque agent possède la structure de la figure ci-dessous, et appartient à des catégories d'infrastructure type. Les agents sont reliés entre eux par des matrices d'adjacence à plusieurs niveaux : entre infrastructures, et entre composants d'une infrastructure. Par exemple, un réseau électrique peut être simulé par ses postes sources et ses interrupteurs sur les lignes MT. Un poste source sera également modélisé par un deuxième niveau, constitué d'agents pour les transformateurs, pour les détecteurs d'intrusion ou d'incendie, pour le système d'accès et de protection contre l'intrusion, et pour la salle d'ordinateurs nécessaires à la maintenance. Tous ces composants sont reliés à la salle de contrôle s'ils sont télécommandables. Les entités échangent à la fois des ressources (bien, service, donnée) et des défaillances, peuvent consommer une ressource, ou en produire en fonction de leur niveau opérationnel, c'est-à-dire de la disponibilité des ressources, de l'absence d'une défaillance ou de l'intégrité de l'agent. Les résultats des simulations sont des variations de capacité de fonctionnement en fonction du temps par infrastructure.

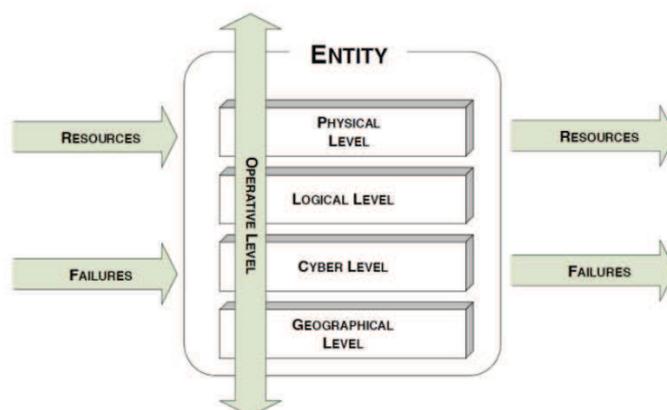


Figure 14 : Structure d'un agent de CISIApro

Le modèle a été appliqué à l'échelle de la ville de Rome pour un scénario de tempête solaire, et est appliqué à la région italienne Calabre. Il a été utilisé dans les projets européens MICIE, CockpitCI, FACIES et URANIUM, et est maintenant inclus dans le projet H2020 Atena. CISIA modélise le réseau électrique, le réseau d'eau, le réseau de gaz, le réseau de télécommunications, le réseau de transport ferré, les routes et les aéroports [Panzieri, 2015] [Foglietta, 2015] [Gaetano, 2013] [Setola, 2014].

I2Sim: Infrastructure Interdependency Simulator est une plateforme de simulation canadienne qui modélise à la fois les systèmes techniques et les systèmes sociaux dans le même modèle. I2Sim est basé sur six types d'objets : les ressources mobiles (ex : ambulances), les cellules (unités de production, comme par exemple un hôpital), les chaînes de transmission (qui transportent les ressources mobiles), les tables fonctionnelles qui définissent en fonction de la ressource disponible la productivité de la cellule, les cellules de contrôle et les objets échangés. Il correspond à une adaptation du modèle « Input output Inoperability Model » (IIM). Contrairement à CISIA, la modélisation des équipements d'infrastructures se fait sur le même plan que les infrastructures entières (voir sur la **Figure 15** les hôpitaux simulés au même titre que l'équipement « pompe » d'une station de traitement des eaux). Il s'agit donc d'une mono-simulation, sans prise en compte du fonctionnement interne. Cependant il ne correspond pas non plus à une approche implicite : A la sortie de certaines cellules se trouvent des opérateurs de distribution, qui répartissent le service disponible (débit d'eau par exemple) aux infrastructures bénéficiaires. Ces lois de distribution ne sont pas statiques et I2Sim peut être testé pour savoir quelle répartition permettrait de diminuer les impacts globaux. On peut assimiler cette possibilité à une simulation de comportement interne. Les résultats de simulation correspondent à l'évaluation de la fonction de sortie de chaque infrastructure (par exemple le nombre de patients traités par heure pour un hôpital, le débit d'eau traité pour une station de traitement des eaux, etc.) [Wang, 2013]. I2SIM a été utilisé en planification lors des jeux olympiques d'hiver de Vancouver de 2010 pour étudier le scénario suivant : la centrale électrique principale du centre-ville tombe en panne au moment où une infrastructure recevant une manifestation sportive s'écroule. [Marti, 2014]. I2Sim modélise entre autre les infrastructures du réseau électrique, du réseau de télécommunications et du réseau d'eau. Il a déjà été utilisé avec un simulateur de séismes en définissant des courbes de vulnérabilité

(dommages physiques en fonction de l'intensité) pour les infrastructures. Il est à noter que I2Sim est en cours d'intégration dans l'outil CIPRNet dénommé CIPCast, détaillé plus loin.

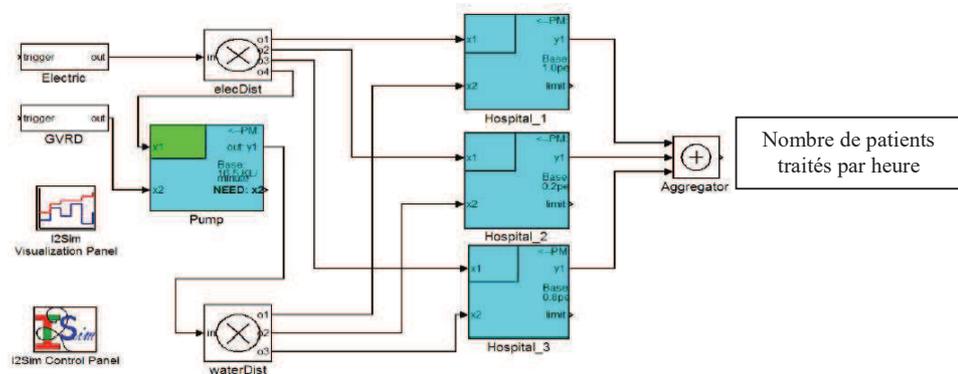


Figure 15 : Simulation I2SIM : trois hôpitaux, une source d'eau potable et une station électrique. [WANG2013]

DIESIS: DIESIS est l'outil développé par le projet européen « Design of an Interoperable European federated Simulation network for critical InfraStructure ». Il a été développé pour prouver la faisabilité de l'EISAC (European Infrastructure Simulation and Analysis Center) qui doit devenir une plateforme web pour héberger une fédération de simulations sur les interdépendances entre infrastructures critiques. DIESIS est conçu lui-même comme une fédération de quatre simulateurs spécifiques: réseau électrique, réseau de télécommunications, réseau ferré et simulateur d'inondation. Les dépendances se font au niveau des infrastructures (**Figure 16**). Il a été appliqué sur un quartier de Rome [Usov, 2014] [DIESIS, 2010]. DIESIS fait partie des projets européens finis qui ont précédé le projet CIPRNet et l'outil correspondant. La **Figure 16** illustre la complexité d'un couplage fort entre simulateurs spécifiques (télécommunications, réseaux ferrés, électricité) avec des liens de dépendances à l'échelle des infrastructures types (gares, bureaux, postes électriques). Mais DIESIS prouve surtout la faisabilité technique de ces programmes complexes, soulignant par-là que la difficulté d'une modélisation d'effet cascade pour la sécurité civile réside surtout dans les contraintes d'acquisition et de partage des données.

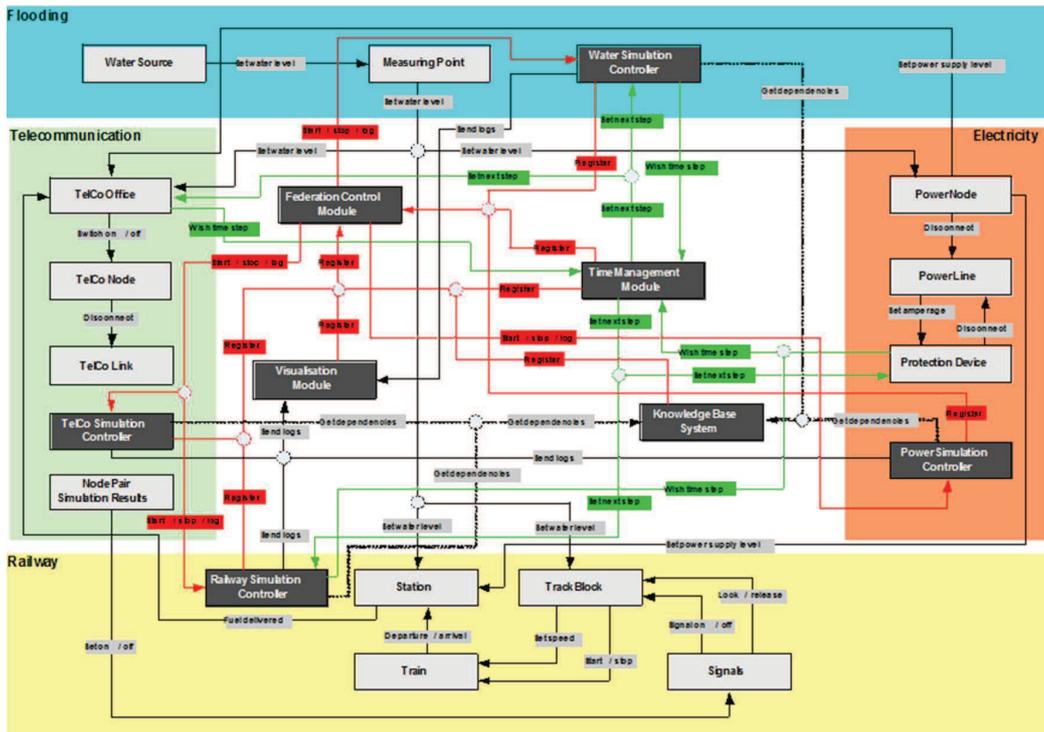


Figure 16 : Fonctionnement de DIESIS [Rome, 2014]

CIPCast, l'outil de CIPRNet : Le projet Critical Infrastructure Preparedness and Resilience Research Network, auquel l'auteur a participé, a permis de développer un outil d'aide à la décision qui combine le retour d'utilisation des outils DIESIS et I2SIM. Cette plateforme web est constituée de cinq briques [Grangeat, CIPRNET Staff Exchange, 2016].

1. La surveillance des phénomènes naturels : l'outil est couplé avec les sites de météorologie et de surveillance sismique, pour pouvoir afficher en temps réel les événements.
2. La prévision d'évènements naturels météorologiques. En effet l'outil est pour l'instant développé sur Rome, ville particulièrement sensible aux inondations par ruissellement lors de fortes pluies.
3. La simulation des dommages aux infrastructures. Chaque infrastructure a une courbe de fragilité par évènement naturel (séisme ou inondation) qui donne la probabilité de défaillance de celle-ci.
4. L'estimation des impacts suite aux dommages calculés. Cette étape se base sur deux simulateurs : le calcul des dommages immédiats (télécommunication et électricité, qui ont une cinétique rapide de propagation de défaillance) puis le calcul des effets cascade, avec I2Sim.

Le calcul des dommages immédiats sur le réseau électrique ne se fait pas à l'aide d'un simulateur électrique à proprement parler. En effet, s'il aurait été envisageable de créer un modèle pour reporter les charges de l'infrastructure défaillante sur les autres infrastructures, les développeurs ont constaté que la répartition des charges sur le réseau changeait très régulièrement. L'ENEA, qui développe ce module, a donc choisi de simuler à la place la réaction de l'opérateur face à la défaillance d'une infrastructure électrique (postes source PS,

lignes MT qui relient certains postes source, branchés aux Postes de Distribution PD). La configuration topologique des lignes MT, des connexions entre les PS et des branchements PD est connue (**Figure 17**). Lorsque l'un des PD est endommagé, c'est l'ensemble de la ligne MT qui tombe instantanément. Puis le simulateur estime un temps de reconnexion des PD non endommagés. Il compte quelques minutes si les PD sont télécommandables, ou bien une demi-heure (le temps d'envoyer une équipe sur place) s'ils sont manuels, en plus du temps de reconfiguration du réseau (alimenter la ligne MT par un autre PS quand cela est possible). On obtient donc par PD non endommagé une estimation du temps de défaillance. A chaque PD est associée une zone d'impact en cas de défaillance, et l'outil simule alors les zones sans électricité en fonction du temps.

Pour le réseau de télécommunications, l'outil sait quelles antennes (BTS) sont alimentées par quel PD, et donc quelles sont les zones qui n'auront plus accès aux communications si ce PD tombe en panne d'électricité. Les BTS ne sont pas considérés pour l'instant comme possédant une batterie. L'outil prend en compte également la dépendance retour : ils savent quel BTS permet à quel PD de communiquer avec le centre de télé-contrôle. Si l'antenne est indisponible, le temps attribué à la reconnexion du PD sera le temps de mobilisation d'une équipe et non pas celui de l'intervention à distance. Il ne s'agit donc pas d'un simulateur spécifique lié au flux électrique, mais d'un simulateur de comportement face à des défaillances. La **Figure 17** schématise la structure du simulateur de comportement. Les ronds rouges sont les infrastructures défaillantes à cause de l'évènement initial. La **Figure 18** représente les postes de distribution défaillants par effet cascade, en prenant en compte l'impossibilité de manipuler à distance les postes dont l'antenne n'avait plus d'électricité. Compte-tenu des temps estimés de réparation entre les différents postes, et des possibilités de reconfiguration, la **Figure 19** représente l'évolution du nombre de défaillances prévues selon l'opérateur (en bleu) ou selon le DSS de CIPRNet CIPCast, qui prend en compte les effets cascade.

La quatrième brique enchaîne avec une estimation sociétale et économique de la perturbation des services essentiels comme l'eau, l'électricité, le gaz et les télécommunications en fonction de l'horaire de la journée, et de la typologie de la population (jeunes enfants, population âgée, population active).

La cinquième brique permet de simuler des scénarios pour comparer les décisions, notamment la priorisation de réparation des infrastructures électriques.

Chapitre 2 : Etat de l'art

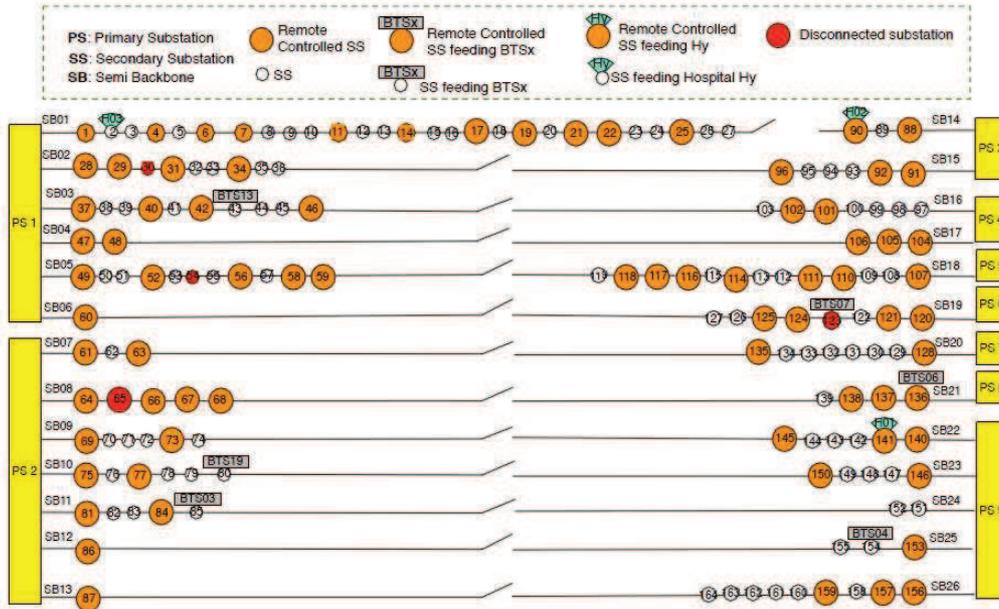


Figure 17 : Représentation du modèle utilisé par CIPRNet pour le calcul de l'effet cascade interne au réseau électrique. Quatre postes de distribution, en rouge, sont initialement impactés par l'évènement [CIPRNet, D7.4, 2015]

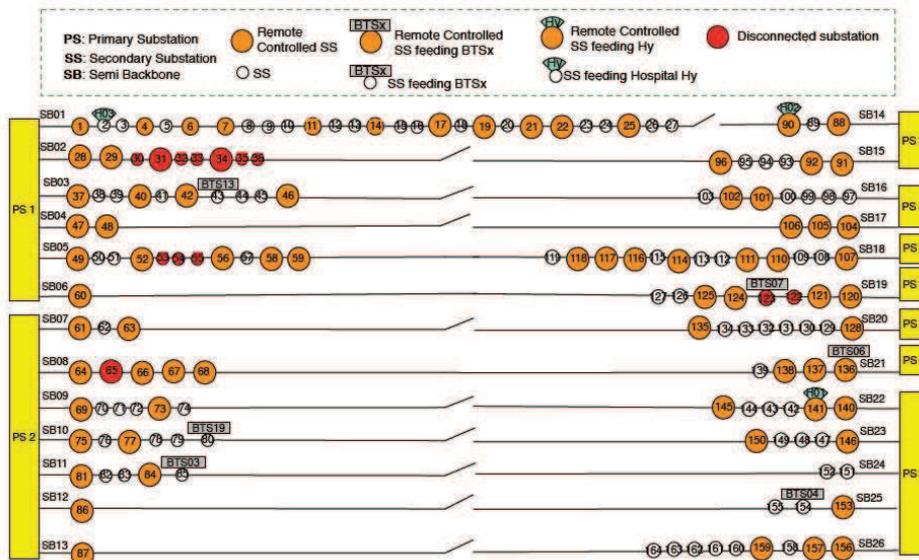


Figure 18 : Représentation du modèle utilisé par CIPRNet pour le calcul de l'effet cascade interne au réseau électrique. Effets cascade provoqués par les quatre postes de distribution initialement impactés, compte-tenu des possibilités de reconfiguration [CIPRNet, D7.4, 2015]

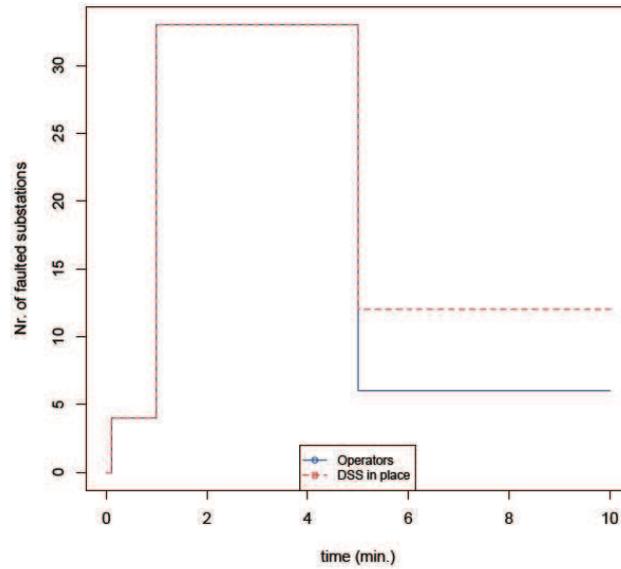


Figure 19 : illustration de l'intérêt de CIPRNet : différence d'estimation du nombre de défaillances dans le temps selon la connaissance de l'opérateur électrique ou selon le calcul du DSS de CIPRNet, qui tient compte des effets cascade électricité-télécommunications

FloodResilienCity : Dans le cadre du projet FloodResilienCity, l'université Paris Diderot et l'Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris ont réalisé un webSIG pour la ville de Dublin. Une partie importante est consacrée à la modélisation du risque inondation, une autre propose la modélisation des réseaux techniques suivants sous formes de graphes mathématiques pour la modélisation des effets cascade [Lhomme, 2012].

- Le réseau d'assainissement. Approximé par les canalisations principales, ce réseau est caractérisé d'un point de vue topologique (redondance nulle, réseau centralisé autour d'une station principale) et physique (réseau vétuste et donc vulnérable face aux inondations).
- Le réseau routier. Il est hiérarchisé entre autoroutes et routes principales. Là encore, il est caractérisé par sa topologie (fortement redondante), mais aussi par ses congestions quotidiennes. A cela s'ajoute le mauvais dimensionnement du réseau d'assainissement, qui entraîne régulièrement des débordements sur la chaussée, et donc une forte vulnérabilité de ce réseau en cas de crues ou pluies (dépendance géographique).
- Le réseau électrique. Bien maillé, il existe cependant des zones non redondantes avec des nœuds terminaux isolés au bout de grandes lignes électriques (nœuds pendants). L'étude topologique fait également apparaître les zones d'interconnexion, dont certaines en zone inondable. Elle s'intéresse aussi aux stations d'alimentation, car leur isolement engendrerait une reconfiguration électrique importante.

Chaque élément de réseau est pondéré par une résistance physique aux inondations. Le logiciel prend en compte les interdépendances entre réseaux, comme par exemple la nécessité

de fonctionnement du réseau électrique par infrastructure d'assainissement. Puis le Web-SIG propose d'analyser la propagation des zones perturbées par différents scénarios d'inondation. Enfin, il propose d'analyser les temps de remise en service plausibles par infrastructure – fonction du personnel sur site, des compétences de maintenance disponibles, de leur éloignement des centres techniques. Cette approche est centrée sur une analyse technique des réseaux, mais elle confirme l'utilité d'étudier les réseaux d'un point de vue topologique pour la modélisation mathématique des voies de propagation des perturbations. La cartographie de zones impactées est ensuite comparée à la localisation des enjeux d'organisation des secours (casernes et hôpitaux) et des enjeux politiques (ambassades et ministères). Cette dernière comparaison relève d'une analyse fonctionnelle d'infrastructures critiques vis-à-vis du risque inondation et réseau.

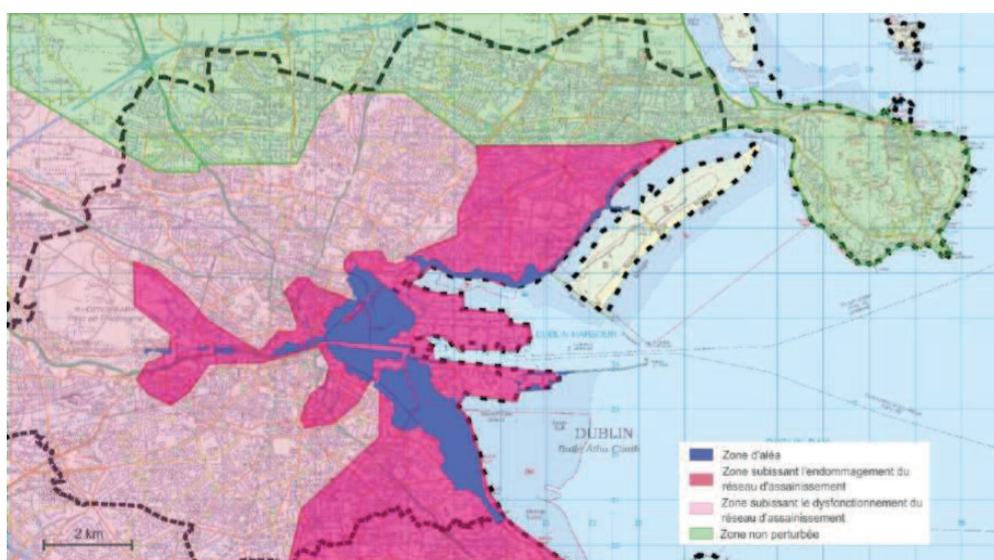


Figure 20 : Outil FloodResilienCity : Zones d'alaé, d'endommagement et de dysfonctionnement du réseau d'assainissement de Dublin suite à un scénario d'inondation [Lhomme, 2012]

Un dernier outil modélise les interdépendances entre infrastructures, mais les descriptions très partielles de son fonctionnement ne permettent pas de le classer en explicite ou en implicite. Le développement de cet outil apporte néanmoins une preuve de l'intérêt de ce genre d'approche pour la sécurité civile.

CIPMA : “Critical Infrastructure Program for Modelling and Analysis” a pour but de modéliser le comportement des systèmes d'infrastructures critiques et leurs relations de dépendances. Il est utilisé et développé par le gouvernement australien dans le cadre de son programme pour améliorer la résilience des infrastructures critiques australiennes. CIPMA est développé pour une approche multirisque : il est capable de calculer l'impact de différentes menaces sur le fonctionnement des infrastructures critiques. Ces résultats sont ensuite fournis aux opérateurs et gestionnaires d'infrastructures critiques pour qu'ils améliorent leurs plans d'urgence. CIPMA permet de calculer les effets 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. Cet outil permet ainsi de tester les plans de continuité d'activité mis en place par les gestionnaires d'infrastructures critiques sur les domaines suivants : énergie (électricité, gaz, pipeline de carburant), eau, télécommunications, transport et secteur bancaire/financier. Là encore l'implication du gouvernement a permis de collecter les données sensibles nécessaires à cet outil auprès des opérateurs (mise en place de TISN : « Trusted Information Sharing Network for Critical Infrastructure Protection ») [Scott, 2007]. L'évènement initial (extérieur à une infrastructure) est associé à une zone de menace. En fonction de la vulnérabilité des infrastructures à cette menace, certaines vont être défaillantes, d'autres vont résister. Une fois les infrastructures défaillantes identifiées, CIPMA simule la propagation de ces défaillances dans les différents réseaux. Puis il calcule l'impact direct et indirect de celles-ci sur la société (Figure 21). En revanche les modèles utilisés n'ont pas été présentés dans la documentation trouvée ce qui empêche CIPMA d'être classé comme approche explicite ou implicite. CIPMA a été utilisé pour simuler les impacts des ouragans Charlie, Ivan, Dennis, Orphelia, Rita and Wilma [Australie, 2015].

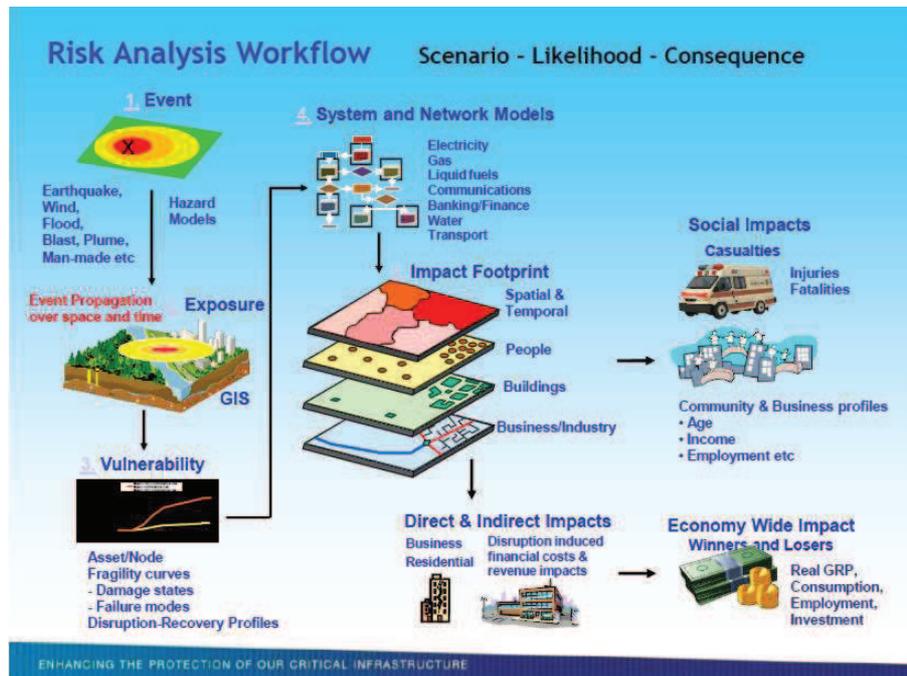


Figure 21 : Fonctionnement de CIPMA [Lew, 2011]

2.2.4 Conclusion sur les outils de modélisation des effets cascade retenus dans les approches explicites et implicites

Les sept outils présentés (hors travaux de Toubin) ont tous réussi à modéliser des effets cascade entre réseaux techniques à l'échelle de l'infrastructure, prenant en compte *a minima* les dépendances physiques, avec des approches différentes. Ils ne constituent pas une liste exhaustive, d'autres projets étant en cours sur la modélisation des effets cascade, comme par exemple le projet PREDICT et son outil Ipdt. Ces outils représentent tous sur des cartes les

infrastructures défaillantes. La dimension spatiale semble donc être une nécessité dans cette approche. De plus, tous sont basés sur une identification au préalable des dépendances aux ressources de chaque infrastructure, même si cela n'est pas toujours stocké dans une base spécifique. Cette connaissance semble donc être le minimum requis avant de construire un modèle d'effets cascade. Le tableau ci-dessous résume les différences entre les outils. La deuxième colonne souligne la présence ou non de couplage entre l'outil et un simulateur de menace, comme l'inondation ou les séismes. La présence de ce simulateur signifie que l'outil intègre des courbes de vulnérabilité des infrastructures en fonction de l'intensité de la menace. Les modèles utilisés sont donnés à titre indicatif mais ne sont pas détaillés, car leur choix découle surtout d'une décision de modéliser les liens sous une forme plutôt qu'une autre. La quantité de données nécessaires est comparée globalement dans le tableau. Cet enjeu est important lorsque l'on parle de mises à jour des données et d'entretien des modèles. Enfin la dernière colonne du tableau renseigne sur la possibilité de comparer les différentes réactions (meilleure allocation des ressources disponibles par exemple) ou s'il ne fait que la modélisation des effets cascade.

Table 5 : Résumé des différences entre les outils de modélisation des effets cascade.
ABM : Agent Based Model, IIM : Input output Inoperability Model

Outils	Explicite Implicite	Quantité de données nécessaires	Description du modèle	Simulation de menace	Possibilité de comparer des réactions
DOMINO	I	+	Base de données relationnelle spatialisée	Non	Non
CISIAPro	I et E	++	ABM	Non	Oui
I2Sim	E	++	IIM modifié	Non	Oui
CIPCast	E	++	Graphe (pré- impact) et IIM modifié pour I2Sim	Oui	Oui
DIESIS	E	++	Fédération de simulateurs	Oui	Non
FloodRes. C.	E	+	Graphe	Oui	Non
CIPMA	?	Non connu	Systèmes dynamiques	Oui	Non connu

La majorité des outils présentés ici ont une approche explicite du fonctionnement interne des réseaux. Ces choix nécessitent une quantité de données importante, hormis pour le choix du graphe. A l'opposé, les approches DOMINO et FloodResilienCity utilisent le strict minimum de données pour modéliser les effets cascade. Ce choix signifie que les zones de service et les liens sont entièrement définis à l'avance par les opérateurs, et que la modélisation des effets cascade aura du mal à s'adapter à un contexte dédié (simulation directive) car ces zones ne sont pas modifiables. Néanmoins, même minoritaire, l'approche implicite est appliquée et maintenue au sein de la sécurité civile du Québec avec l'outil DOMINO, ce qui est un gage de

sa crédibilité. Elle est relativement proche de celle observée lors de l'exercice Sequana, où par jour de scénario, les zones de services défaillants étaient pré-calculées. Le choix des modèles ne se pose pas uniquement en termes techniques. Il concerne la volonté d'établir et de maintenir une capacité de simulation complémentaire à celle disponible chez les opérateurs, tout en respectant les choix de partage et de confidentialité de données acceptés par les opérateurs. De plus, il faut bien évaluer le niveau de détail réellement utile pour la sécurité civile ou pour les opérateurs lorsque l'on parle de gestion de crise. La description de tous les équipements n'est pas forcément nécessaire, quand la compréhension globale de la cinétique de l'effet cascade apparaît, elle, comme essentielle.

Le présent travail n'a pas pour but de classer les outils de modélisation des effets cascade à la place des décideurs, mais de mettre en avant des critères de choix, et de proposer une méthodologie qui corresponde au niveau de détail disponible et aux résultats attendus (voir le paragraphe Analyse des manques). Nous avons fait l'hypothèse de modéliser uniquement les dépendances géographiques, physiques et cybernétiques pour la modélisation des effets cascade, sur des simulations de plusieurs heures et non pas sur plusieurs journées. Cependant la gestion d'une crise et du retour à la normale correspond à un temps plus long, où les interactions organisationnelles ont leur importance.

L'analyse de la vulnérabilité et de la résilience des réseaux techniques face à différents scénarios qui tiennent compte des effets cascade a pour but d'établir les points faibles et forts des réseaux par scénario et leurs axes d'amélioration. Dès lors que l'on parle de résilience, il faut intégrer dans l'analyse les réactions organisationnelles, et l'analyse du retour à la normale. On se place donc sur un temps d'analyse différent que pour la modélisation des effets cascade, et sur un système sociotechnique au lieu d'un système uniquement technique. La section suivante propose différentes méthodes d'évaluation de la vulnérabilité et de la résilience.

2.3 Méthodes existantes d'évaluation de la vulnérabilité et la résilience des réseaux techniques

Cette partie propose différentes méthodes existantes d'évaluation de la vulnérabilité et de la résilience face à des scénarios caractérisés en localisation et en intensité. Pour rappel, ce travail définit la vulnérabilité face à un scénario de risque et non pas indépendamment d'un scénario.

2.3.1 Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

Nous avons vu que la notion de vulnérabilité est très souvent liée à la notion d'endommagement, qui dépend de la sensibilité et de l'exposition du système. Ce paragraphe présente quelques méthodologies d'analyse de la vulnérabilité qui possèdent une définition proche de celle adoptée dans le présent travail : « perte de performance du système mesurée à la fin de la réaction passive de celui-ci face à un aléa caractérisé ».

Chapitre 2 : Etat de l'art

Le CGEDD a publié en 2013 un rapport sur la « vulnérabilité des réseaux d'infrastructures aux risques naturels ». Il y propose à titre indicatif une approche systémique par aléa, croisée avec les réseaux techniques, uniquement sur l'aspect endommagement. Puis il détaille, réseau par réseau, les infrastructures vulnérables à tels ou tels types d'aléas. Cependant il n'y a pas d'indicateur quantifié et l'approche reste très générale [CGEDD, 2013].

Table 6 : Classement des vulnérabilités des réseaux techniques vis-à-vis des aléas naturels [CGEDD, 2013]

	Réseau routier	Réseau ferré (infra)	Réseau ferré (signalisation et SI)	Ligne électrique aérienne	Ligne HT enterrée	Réseau de distribution électrique enfoui	Gazoduc enterré	Cours d'eau navigable	Port maritime
Crue et inondation de plaine	**	**	**		*	*	*	***	*
Tempête de vent	*	*	**	***		*			*
Houle, surcote marine	*	*	*						**
Séisme	**	**		*		*			**
Inondation rapide	***	**	**	*	*		*	**	
Neige exceptionnelle	**	**	*	**		*			*
Tsunami	**	**	*	*					**
Grand froid	*	*	*			**		*	
Canicule			**			*			
Chutes de blocs	**	**		*	*	*			
Effondrement (karst...)	*	**				*	*	*	
Avalanche	**	**	*	*		*			

*** (très vulnérable) ; ** (vulnérable) ; * (peu vulnérable) ; (vide) (non vulnérable ou sans objet)

La majorité des auteurs établit un classement de vulnérabilité à l'échelle de l'infrastructure, basé sur la sensibilité ou la propension à l'endommagement face à certains phénomènes. L'approche de CIPRNet propose dans un même outil de s'intéresser aux vulnérabilités face à plusieurs types d'aléas comme les pluies intenses, les séismes et les vagues de chaleur ou de froid [CIPRNet, D7.2 et D7.3, 2015 et CIPRNet D7.6, 2016]. Toutes ces approches sont basées sur des courbes de vulnérabilité de type intensité de l'aléa/ probabilité de défaillance, que celles-ci soient basées sur des modèles de simulation ou sur des retours d'expériences de précédentes crises. Cependant l'outil se garde bien d'agréger ces vulnérabilités dans un indice global multirisque, qui n'aurait aucun sens en termes de probabilité. Quelques indicateurs de vulnérabilité spécifiques à des phénomènes naturels étendus comme les séismes ou les inondations, puis face à des actes de malveillance sont présentés ci-après.

Risque sismique

Le risque sismique est l'un des risques où l'endommagement physique des infrastructures est la mesure la plus importante : celle-ci est détruite, fragilisée, ou bien a résisté. Il existe de nombreux simulateurs du risque sismique, mais tous ne couvrent pas tous les aspects d'un séisme. On parle par exemple de simulateurs qui calculent les PGA (peak ground acceleration), les PGV (peak ground velocity) ou les PGD (peak ground displacement). Les infrastructures, selon leur nature, ne sont pas sensibles de la même manière à ces trois composantes du risque. Face à ces trois composantes, Halfaya [Halfaya, 2012] a identifié les facteurs d'endommagement pour les réseaux techniques enterrés.

- Autour de l'aléa sismique : les secousses, traduites par les PGV, PGD, PGA, mais aussi les glissements de terrains (déformations permanentes) ou la liquéfaction (lorsque les sols sont saturés), l'apparition de failles,
- Autour de la configuration des infrastructures (notamment lorsque il y a des grandes différences d'altitudes, ou au niveau des points de jonctions) : est-ce que les canalisations sont d'un seul tenant et rigides, ou bien sont-elles segmentées avec des joints « flexibles » ; le nombre de discontinuités qui créent des points rigides, ou encore l'âge, la corrosion et le diamètre des canalisations.

Cet inventaire très complet lui permet de cartographier les vulnérabilités (en tant que facteur agrégé) du réseau d'eau de Blida face au risque sismique. Adachi [Adachi, 2008] reprend cette notion de vulnérabilité face au risque sismique, mais ne considère pour le réseau d'eau que la longueur des canalisations, leur diamètre et leur âge. Cependant il ajoute un facteur de vulnérabilité fonctionnelle, à savoir la probabilité que l'infrastructure électrique qui alimente telle infrastructure du réseau d'eau ne fonctionne plus, et la probabilité que le générateur de secours ne fonctionne pas. On voit ainsi qu'il existe une disparité lorsque l'on parle de « facteurs de vulnérabilité », selon que l'on est plus ou moins exhaustif sur l'ensemble des facteurs impactant les infrastructures. Néanmoins face au risque sismique, beaucoup parlent de statistiques, de courbes de fragilité et d'endommagements matériels.

Risque inondation

Le guide FloodProbe [FloodProbe, 2013] définit la vulnérabilité d'une infrastructure comme son exposition et sa propension à être endommagée par une inondation. La méthodologie développée permet de calculer un indice de vulnérabilité sur la base de seuils d'intensité (comme la hauteur d'eau par exemple, la durée, la salinité de l'eau ou les courants). La sensibilité des infrastructures va dépendre de leur résistance aux paramètres précédents, c'est-à-dire leur capacité à être inondées sans subir de dommages. Ces dommages sont exprimés en termes de coûts et de durée d'indisponibilité (réparation). Ils sont calculés de façon statistique, en fonction des caractéristiques du bâtiment (présence de murs extérieurs, d'étages, de fenêtres, de matériel électrique, de fondations, etc.). Avant de calculer un endommagement, l'outil vérifie à l'aide d'abaques la probabilité d'effondrement des bâtiments selon la hauteur d'eau, par type de construction. Des approches plus qualitatives existent également, comme celle de Toubin [Toubin, 2014] qui recense les capacités de « résistance » non probabilisée des infrastructures, lorsqu'elle parle d'endommagement des infrastructures face à une

inondation, comme illustré ci-dessous. Là encore, l'évaluation des facteurs de vulnérabilité est biaisée par la sélection de ces facteurs –et par les données disponibles pour l'évaluation.

Table 7 : capacité de résistance des infrastructures réseaux dans Paris face à une inondation. Vert : bonne, vert clair : plutôt bonne, rose : plutôt mauvaise. [Toubin, 2014]

résistance	
ERDF	le réseau ne doit pas être en contact avec l'eau
GRDF	le réseau basse pression ne doit pas être ennoyé (dépose des détendeurs)
CPCU	les caniveaux ne doivent pas être ennoyés mais des moyens de pompage locaux peuvent contenir l'infiltration
Climespace	le réseau et les centrales sont étanches
Eau de Paris	le réseau en pression ne craint pas l'inondation les usines sont hors crue
SAP	le réseau est conçu pour supporter des volumes importants
SIAAP	plusieurs usines et ouvrages sont soumis à la contrainte de l'eau ou sont inondables
Proprete	plusieurs ateliers sont en zone inondable (notamment la SMM)
SYCTOM (IP13)	l'usine est protégée de la crue
Voirie	les voies sont protégées localement par batardeaux
RATP metro	le réseau est protégé des entrées d'eau
Orange	les NRA exposés sont protégés, les équipements de répartition ne doivent pas être en contact avec l'eau

Actes de malveillance

D'autres études s'intéressent à la vulnérabilité face aux actes de malveillance. Liu [Liu, 2012] définit le risque comme étant la combinaison de la menace, de la vulnérabilité et de l'impact engendré. La vulnérabilité n'est donc pas envisagée exactement telle que définie dans ce travail. La vulnérabilité aux actes de malveillance est vue selon Liu comme toute fragilité d'un bien qui peut être exploitée par un agresseur pour provoquer des dommages. Néanmoins son analyse de la vulnérabilité est intéressante : Après avoir identifié les infrastructures essentielles pour un processus, il établit une liste de scénarios qui rentrent dans la catégorie « actes de malveillance », avec leur description et les modes possibles d'attaque. Il y considère par exemple le vol, les troubles d'ordre public, le sabotage, les attaques aux cocktails Molotov, les attaques avec explosifs, par véhicule, les attaques chimiques/biologiques/radiologiques, ou des agresseurs armés. Puis une troisième étape évalue la probabilité de chaque menace en fonction de la facilité de réalisation de celle-ci, le

passé historique de ce genre d'attaque, la portée symbolique, l'accessibilité, et l'ordre de grandeur de l'impact. Enfin, il attribue une note de vulnérabilité à chaque bâtiment selon quatre axes.

- La susceptibilité : cela concerne à la fois l'attractivité du bâtiment, et son degré de « faiblesse ». Une grande faiblesse signifie que la vulnérabilité est évidente et facile à exploiter par un agresseur sans être détecté.
- L'adéquation entre le niveau de protection et les menaces applicables au bâtiment.
- Le niveau de redondance : il s'agit des équipements ou des procédés dans une infrastructure, et de la possibilité d'avoir des solutions de secours si l'un de ceux-ci venait à être arrêté.
- La durée de retour à la normale.

Le dernier point est hors de la définition de ce travail lorsque l'on parle de vulnérabilité (il appartient à la notion de résilience). Néanmoins les facteurs précédents sont intéressants à souligner, tout comme l'échelle d'évaluation proposée par l'article.

Table 8 : Echelle de vulnérabilité face à des menaces d'actes malveillants [Liu, 2012]

Score	Susceptibilité	Mesures de sécurité	Redondance	Période de retour
5	Une faiblesse majeure ou plus a été identifiée, ce qui rend l'installation extrêmement sensible à un acte malveillant.	Manque de mesures de sécurité.	Aucune redondance.	L'installation peut être fonctionnelle en plus d'un mois après un acte malveillant.
4	Une faiblesse majeure ou plus a été identifiée, ce qui rend l'installation très sensible à un acte malveillant.	Faible mesures de sécurité.	Faible redondance. 25 % des fonctions de l'installation peuvent être restaurées.	L'installation peut être fonctionnelle en un mois après un acte malveillant.
3	Une faiblesse a été identifiée, ce qui rend l'installation modérément sensible à un acte malveillant.	Mesures modérées de sécurité.	Moyenne redondance. 50 % des fonctions de l'installation peuvent être restaurées.	L'installation peut être fonctionnelle en un semaine après un acte malveillant.
2	Une faiblesse mineure a été identifiée, ce qui rend l'installation légèrement sensible à un acte malveillant.	Mesures de sécurité de bonne qualité.	Bonne redondance. 75 % des fonctions de l'installation peuvent être restaurées.	L'installation peut être fonctionnelle en un jour après un acte malveillant.
1	L'installation est très peu sensible à un acte malveillant.	Mesures renforcées de sécurité.	Forte redondance. 100 % des fonctions de l'installation peuvent être restaurées.	L'installation peut être fonctionnelle immédiatement après un acte malveillant.

Puis Liu propose une échelle d'impact, en termes de morts, blessés, dommages matériels, perte de services et coûts. La multiplication des notes sur la menace, la vulnérabilité et l'impact, donne la note du risque par scénario. Il n'y a pas là d'agrégations de vulnérabilité en une somme considérant l'ensemble des scénarios. Liu souhaite obtenir, par bâtiment, un profil du risque concernant un ensemble de scénarios relatifs aux actes de malveillance. Il souligne par ailleurs l'importance que chaque questionnaire soit rempli par les gestionnaires de l'infrastructure, qui connaissent le mieux le fonctionnement de celle-ci.

Le ministère de la santé et des solidarités s'est également intéressé en 2007 à la vulnérabilité des réseaux d'eau potable face aux actes de malveillance et a publié un guide intitulé « les systèmes d'alimentation en eau potable - évaluer leur vulnérabilité » [MSS, 2007]. Ne sont

Chapitre 2 : Etat de l'art

pris en considération dans ce guide que « les actes de malveillance générateurs d'une contamination de l'eau d'alimentation (l'eau étant le vecteur potentiel du contaminant introduit) à l'exclusion de tout autre acte visant la destruction ou la mise hors d'usage des ouvrages et installations du système d'alimentation.) ». Le guide propose des questionnaires d'auto-évaluation avec six sous-critères qualitatifs : La vulnérabilité spécifique relative à la nature de l'infrastructure, la protection physique du site, la protection physique de l'équipement, la surveillance, la réactivité, et la gravité en cas de pollution introduite par cette infrastructure. Ces critères sont décrits dans le tableau ci-dessous. Seulement une seule question sur les 50 fiches possédant chacune une dizaine de questions concerne l'existence ou non de groupes électrogènes testés. Il n'y a pas de mention d'attaque sur les services supports, seules les attaques directes occasionnant une pollution sont considérées. Ce guide a été réalisé pour donner les moyens aux opérateurs d'évaluer régulièrement le niveau de vulnérabilité face aux actes malveillants.

Table 9 : Critères d'évaluation de la vulnérabilité des ouvrages du réseau d'eau potable [MSS, 2007]

Critère	Sous-critère	Dénomination	Description
Niveau d'insécurité	Vulnérabilité spécifique	A	Caractéristiques spécifiques de l'ouvrage ou de l'étape de production qui la rendent vulnérable à des actes de malveillance
	Protection physique du site	B	Dispositifs empêchant l'intrusion d'une personne sur le site de l'installation
	Protection physique de l'équipement	C	Dispositifs empêchant la contamination de l'eau après intrusion de personnes dans l'installation
Non détectabilité	Surveillance	D	Dispositifs de détection de la présence de personne dans l'installation Dispositifs de détection d'une contamination de l'eau
	Réactivité	E	Capacités de réaction en cas de crise
Gravité	Gravité	F	Pourcentage de la population totale en aval de l'installation concernée Vulnérabilité des usagers du réseau d'alimentation en eau potable en aval de l'installation concernée. Incidence d'un isolement de l'installation sur le maintien de la fourniture d'eau

Conclusion sur les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité par risque

La plupart des études précédentes sont centrées sur un seul type d'aléa, décliné en scénarios d'intensité et de caractéristiques. Ces approches soulignent bien l'importance de spécifier les facteurs de vulnérabilité selon l'aléa considéré. Le choix plus ou moins exhaustif de ces facteurs va donc fortement influencer l'analyse de vulnérabilité.

Pour obtenir une évaluation à l'échelle de l'infrastructure, deux approches ont été présentées : une approche statistique d'endommagement, ou bien un questionnaire complété par les gestionnaires d'infrastructures, spécifique à chaque infrastructure. Aucune approche statistique n'a permis de construire un indice global de vulnérabilité à l'échelle du réseau.

Seules les approches qualitatives ont permis de définir globalement si un réseau est plus ou moins vulnérable face à tel ou tel événement via des catégories de vulnérabilité, sans considérer spécifiquement les vulnérabilités de chaque infrastructure. Ces méthodes non statistiques soulignent que c'est aux opérateurs de définir leur vulnérabilité matérielle et fonctionnelle, car ils connaissent le mieux leurs infrastructures et leurs seuils de défaillances. Au vu de l'enjeu, il est intéressant d'avoir une évaluation fiable infrastructure par infrastructure, ce qui souligne l'intérêt d'utiliser une approche en partenariat avec les opérateurs dans leur propre évaluation de la vulnérabilité.

L'utilisation d'un questionnaire par scénario et par catégorie d'infrastructure -comme le fait [MSS, 2007]- oblige à rester « vague » dans les questions et à décliner une quantité très importante de questions. Malgré cela, le questionnaire a l'avantage de n'utiliser qu'une information agrégée par l'opérateur lui-même, et donc plus intelligible car on ne rentre pas dans les détails techniques (méthode implicite).

2.3.2 Méthodes d'évaluation de la résilience

Si la notion de vulnérabilité est attachée majoritairement au système technique, nous avons vu que la notion de résilience s'intéressait à la notion de réponse active, et donc à un système sociotechnique. Pour rappel, nous avons défini la résilience des réseaux techniques comme construite sur trois capacités : la capacité d'absorption, celle d'adaptation et celle de récupération. L'absorption correspond à la réaction passive du système technique, et donc à la définition de « vulnérabilité » choisie (perte de performance du système mesurée à la fin de la réaction passive de celui-ci). L'adaptation correspond à la réaction active du système sociotechnique pour gérer la crise et mettre en place des solutions palliatives temporaires. Enfin, la capacité de récupération correspond à la mise en œuvre de solutions durables pour atteindre le « retour à la normale ». La résilience sera évaluée dans ce travail en fonction des scénarios détaillés et localisés, et non pas comme une résilience détachée de l'évènement (capacité qui serait alors intrinsèque). Cela implique que les méthodes liées à la théorie des graphes (voir [Lhomme, 2012] pour plus de détails sur celle-ci) ne soient pas considérées ici, car elles sont utilisées pour évaluer une propriété intrinsèque de résilience. Ce paragraphe présente les méthodologies d'évaluation de la résilience qui se basent sur une définition proche de celle retenue dans le présent travail.

Marie Toubin propose une évaluation de la résilience des services urbains de Paris face à la crue centennale de la Seine selon trois axes : la capacité de résistance, la capacité d'absorption, la capacité de récupération. Il est intéressant d'observer le glissement sémantique entre les définitions qu'elle propose et la dénomination que ce travail utilise. Le **Table 10** est nécessaire pour comprendre en quoi les résultats de ces enquêtes (**Table 11**) correspondent au découpage de notre travail.

Table 10 : Comparaison entre les capacités de résilience utilisées par Toubin [Toubin, 2014] et celles adoptées dans notre travail

Définitions de Toubin	Définitions de ce travail
<p>« La capacité de résistance traduit la capacité du réseau à limiter les endommagements matériels face à des contraintes du fait de sa conception, des matériaux utilisés, etc. »</p> <p>« La capacité d'absorption est la capacité du système en réseau à répartir la contrainte ou à mobiliser des alternatives en s'appuyant sur sa structure »</p>	<p>Cela correspond à la définition de la capacité d'absorption comme « réaction passive du système technique mesurée en termes de perte de performance »</p>
<p>« La capacité de récupération traduit la capacité du système à rétablir son fonctionnement en mobilisant les moyens nécessaires, en organisant les interventions, notamment au regard des priorités et de l'accessibilité des équipements. »</p>	<p>Elle est scindée en deux phases dans ce travail : la capacité d'adaptation correspond à la réaction active du système sociotechnique pour gérer la crise et mettre en place des solutions palliatives temporaires. La capacité de récupération correspond à la mise en œuvre de solutions durables pour atteindre le « retour à la normale ».</p>

Table 11 : Evaluation des capacités de résilience des services urbains de Paris face à la crue centennale sans prise en compte des interdépendances [Toubin, 2014]

	résistance	absorption	récupération	
ERDF	le réseau ne doit pas être en contact avec l'eau	les multiples sources peuvent amortir la perte de quelques postes sources le maillage du réseau permet de contourner des zones impactées (pilotage par l'agence de conduite régionale)	les effectifs et les moyens mobilisables sont importants et disponibles la mise en sécurité doit favoriser le rétablissement	
GRDF	le réseau basse pression ne doit pas être ennoyé (dépose des détendeurs)	le réseau est peu maillé la perte d'un poste impacte plusieurs clients sans possibilité de reprise	les effectifs et les moyens mobilisables sont importants et disponibles la dépose doit favoriser le rétablissement	
CPCU	les caniveaux ne doivent pas être ennoyés mais des moyens de pompage locaux peuvent contenir l'infiltration	le réseau est maillé plusieurs sources de production alimentent le réseau mais leur rayon d'action est limité le pilotage est indispensable	les moyens sont limités la remise en service de tronçons ennoyés est longue	
Climespace	le réseau et les centrales sont étanches	le réseau est peu maillé une seule centrale alimente la zone	l'endommagement de la centrale est difficile à anticiper	
Eau de Paris	le réseau en pression ne craint pas l'inondation les usines sont hors crue	le réseau est fortement maillé de nombreuses sources sont disponibles la perte du pilotage est gérable	les endommagements devraient être limités (conduites en pleine terre éventuellement) les effectifs sont assez importants	
SAP	le réseau est conçu pour supporter des volumes importants	les usines de crue régulent les débits (rejets en Seine) le réseau fonctionne en gravitaire des interventions manuelles en direct sont possibles	les moyens sont importants l'endommagement des usines de crue est limité, sauf au-delà de 1910	
SIAAP	plusieurs usines et ouvrages sont soumis à la contrainte de l'eau ou sont inondables	les ouvrages de gestion des eaux pluviales doivent être isolés de la Seine (rejets en Seine) le pilotage est indispensable	l'endommagement des usines de traitement (ou dérèglement (des processus bactériens) est long à rétablir	Légende des niveaux de résilience
Proprete	plusieurs ateliers sont en zone inondable (notamment la SMM)	le maillage des ateliers permet une réorganisation des services	les effectifs et les moyens sont importants	bon
SYCTOM (IPa3)	l'usine est protégée de la crue	l'usine doit s'arrêter	l'endommagement de l'usine est difficile à anticiper	plutôt bon
Voirie	les voies sont protégées localement par batardeaux	le maillage est important sauf pour les traversées de Seine la régulation de trafic et l'éclairage défont	le nettoyage des voies pourra être long mais les moyens disponibles sont importants le rétablissement de la régulation de trafic est incertaine	plutôt mauvais
RATP metro	le réseau est protégé des entrées d'eau	le réseau est fortement maillé ce qui oblige à l'arrêt du service très tôt, sur de grandes portions de lignes	si les protections fonctionnent, le rétablissement est rapide sinon, les dommages seront très longs à réparer	mauvais
Orange	les NRA exposés sont protégés, les équipements de répartition ne doivent pas être en contact avec l'eau	le réseau est fortement maillé la perte d'un NRA interrompt tous les services de la zone couverte	les effectifs et les moyens mobilisables sont importants et disponibles la dépose doit favoriser le rétablissement	inconnu

Le **Table 11** montre les résultats qualitatifs fournis par les opérateurs après les interviews. Ces résultats sont valables opérateur par opérateur, sans prise en compte à ce stade de leurs interdépendances. Ils illustrent le fait que l'on peut être bon pour certaines capacités de résilience, et plus mauvais pour d'autres. Le découpage dans une sorte de « signature » des capacités de résilience permet de mettre en lumière les points à améliorer : la résilience n'est pas homogène selon les capacités. Cependant cela reflète également les choix stratégiques réalisés par les opérateurs face à un scénario de crue centennale. En effet, Toubin a mis en évidence que ceux-ci priorisaient des indicateurs différents, selon qu'ils étaient orientés plutôt vers la continuité de service ou le rétablissement. Elle recense par exemple les indicateurs de surface ou de nombre de clients impactés, de nombre de jours de défaillance, de coût des dommages ou encore de coûts d'exploitation ou de maintenance. Par exemple, toujours selon Toubin, ERDF cherche à minimiser le temps de fonctionnement dégradé (nombre d'heures de coupure) plus que le nombre de clients impactés, et va donc prioriser l'arrêt et la mise en protection des équipements vulnérables avant la crue. La **Figure 22** propose le positionnement stratégique des opérateurs sur la capitale face à la crue centennale de la Seine. On voit ainsi que l'évaluation de la résilience est dépendante des objectifs fixés par les opérateurs et qu'il faut en tenir compte lorsque l'on évalue la résilience d'un système.

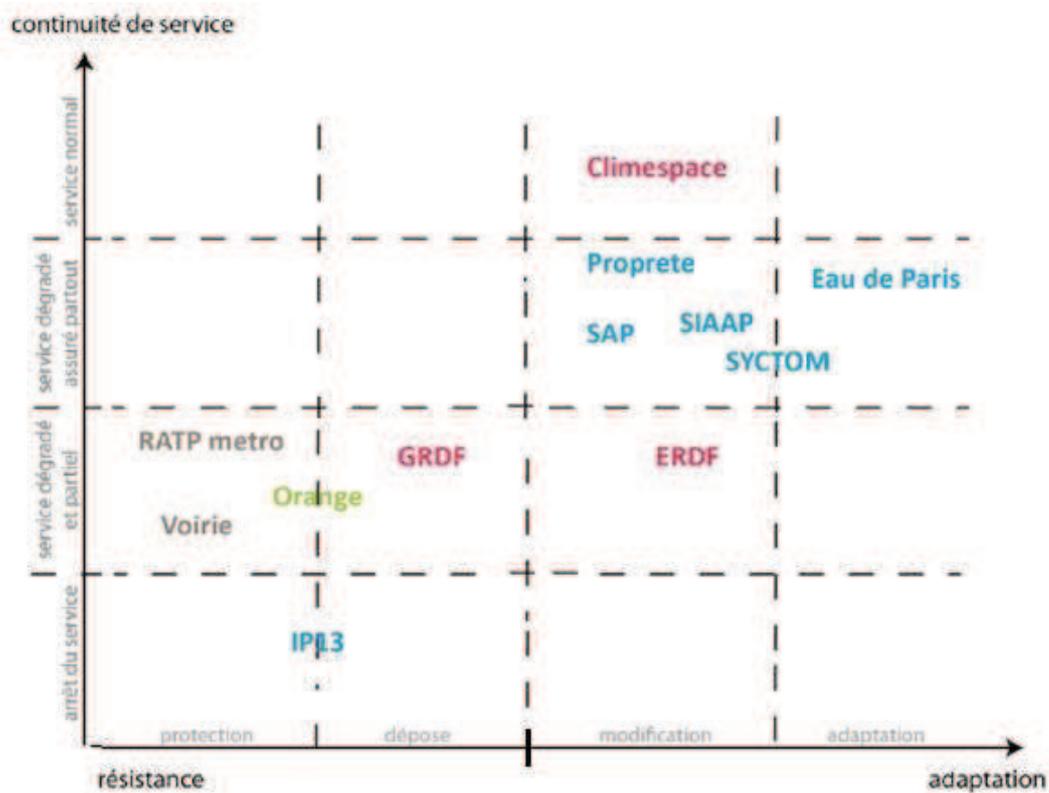


Figure 22 : Positionnement stratégique des opérateurs de services urbains de Paris face à la crue centennale de la Seine. Adaptation d'une figure de [Toubin, 2014]

Johansson [Johansson, 2010] s'appuie également sur l'expertise des opérateurs pour évaluer la résilience. Cependant lui conçoit la résilience selon deux propriétés, la robustesse et la rapidité de retour à la normale, propriétés qu'il mesure sur une courbe de niveau de performance en fonction du temps. Ces courbes sont établies par un groupe d'experts du réseau technique, en prenant en compte la réponse technique et organisationnelle qu'ils estiment comme la plus probable. Ces courbes sont définies face à un lot de scénarios. Johansson part d'un scénario réel -par exemple un arbre tombé sur une voie ferrée qui fait dérailler un wagon- et le décline en différents scénarios : deux wagons puis trois et quatre wagons qui déraillent simultanément. Pour chacun de ces scénarios détaillés et regroupés en catégories, il demande aux experts d'estimer un temps de retour à la normale et un niveau de perturbation de la fonction du système. Il obtient alors par catégorie de scénarios, des courbes de réponse du système. Ces courbes lui permettent d'identifier les limites de gestion des acteurs en termes d'intensité de scénario. Elles lui permettent également de comparer la qualité des courbes entre les scénarios pour apprécier les différences de résilience du système face à ceux-ci.

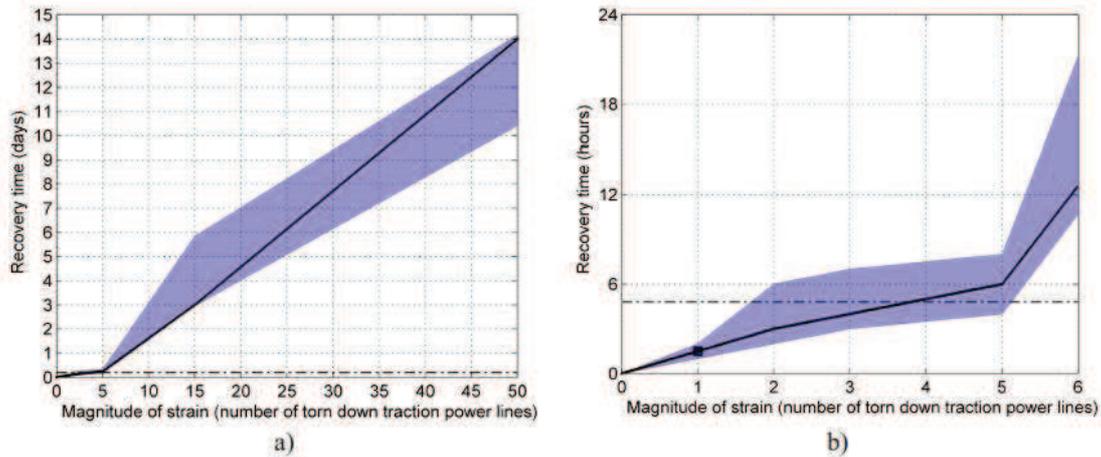


Figure 23 : Estimation du temps de réparation selon le nombre de lignes de traction électrique arrachées en même temps [Johansson, 2014]

Le travail de Johansson introduit la notion de « courbe de performance ». La constitution de courbes de performance par scénario permet d'améliorer la connaissance du système et d'identifier sa limite de capacité en gestion des crises. Cependant celle-ci n'est pas calculée sur la base d'un modèle sociotechnique, mais estimée sur la base de connaissances, et elle ne distingue pas les trois capacités de résilience du système.

Alsubaie [Alsubaie, 2015] propose une simulation du système sociotechnique à l'aide d'I2Sim (voir l'état de l'art sur les outils de modélisation pour en savoir plus sur ce dernier) afin de mesurer la résilience d'un système. Même si dans son approche théorique il distingue bien trois attributs de résilience (la structure du système, sa dynamique, et les capacités organisationnelles), il suppose que la modélisation d'une courbe de performance d'un système avec I2Sim tient compte de ces trois attributs. La résilience correspond alors à l'aire sous la courbe de performance en temps de crise, normalisée par la durée de la crise. Même si cette approche ne distingue pas des capacités de résilience, l'utilisation d'une simulation permet de

faire varier les paramètres des décisions prises lors d'une crise (priorisation des ressources), et de comparer les décisions prises pour les optimiser. La figure ci-dessous illustre les différentes performances d'un hôpital (en termes de nombre de patients traités par heure) selon le scénario ci-dessous (extrêmement détaillé) et le fait qu'il y ait une évolution indépendante des réparations des services, ou bien une priorisation des réparations pour améliorer la performance de l'hôpital. Tout comme Alsubaie, Bruneau reconnaît plusieurs aspects de la résilience mais n'utilise que l'aire de la courbe de performance pour en évaluer un indicateur global [Bruneau, 2003].

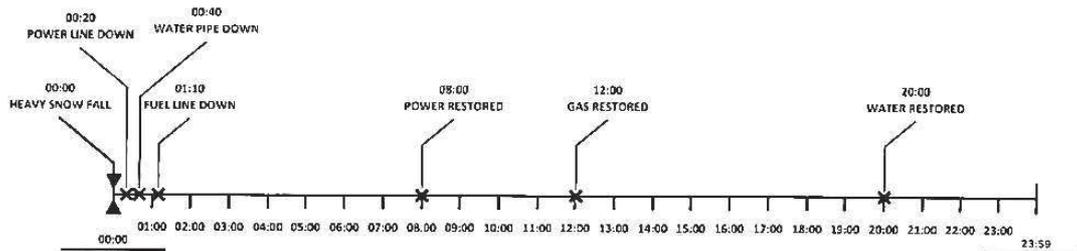


Figure 24 : Frise chronologique du scénario utilisé par [Alsubaie, 2015]

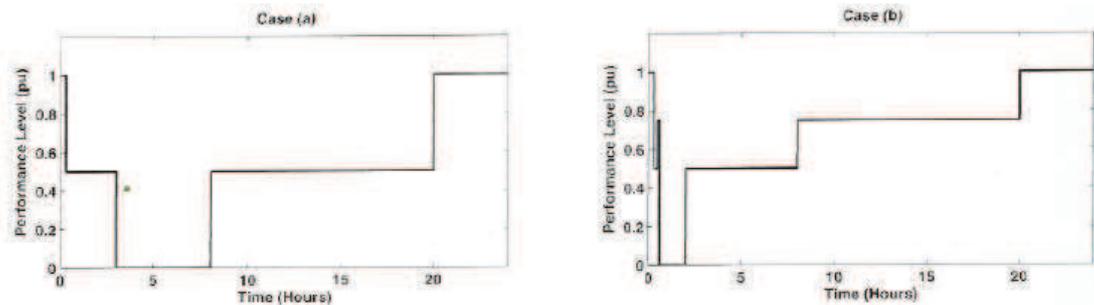


Figure 25 : Evolution de la performance d'un hôpital suite au scénario de la Figure 24, en nombre de patients traités par heure, selon qu'il n'y ait eu aucune optimisation de ressource (gauche) ou une optimisation de la ressource disponible (droite) avec l'outil I2Sim

Les travaux de Francis [Francis, 2014] distinguent sur une courbe de performance les trois phases de résilience. Sur la courbe ci-dessous, il considère S_p comme la vitesse de récupération, F_o la performance initiale du système (associée à t_d), F_d la performance immédiatement après l'évènement (associée à t_d'), F_r^* la performance après que le système ait trouvé un état stable temporaire (associée à t_s), et F_r la performance finale du système (associée à t_r , à distinguer de t_r^* qui correspond au moment où il n'y a plus aucune action de réparation en cours). La capacité d'absorption est définie comme la perte immédiate de fonctionnalité, soit le rapport F_d/F_o , et la capacité d'adaptation est définie comme le rapport F_r/F_o . Francis observe également l'état intermédiaire où le système a mis en place des solutions palliatives (par exemple les groupes électrogènes pour compenser une coupure électrique) en utilisant F_r^* au lieu de F_r . La capacité de réparation est définie par la rapidité de réparation S_p , caractéristique présentée par Francis comme adimensionnel et proportionnel (facteur k) au rapport du temps nécessaire pour obtenir un état stable temporaire sur le temps

nécessaire pour obtenir un état stable final. Le facteur k est explicité dans l'article sans justification précise et ne sera pas présenté ici. Il définit alors un facteur de résilience ρ , adimensionnel lui aussi, comme le produit de ces trois indicateurs :

$$\rho = S_p \frac{F_r F_d}{F_o F_o} \quad \text{et} \quad S_p = k \frac{t_\delta}{t_r^*}$$

Équation 1 : Calcul de la résilience selon [Francis, 2014]

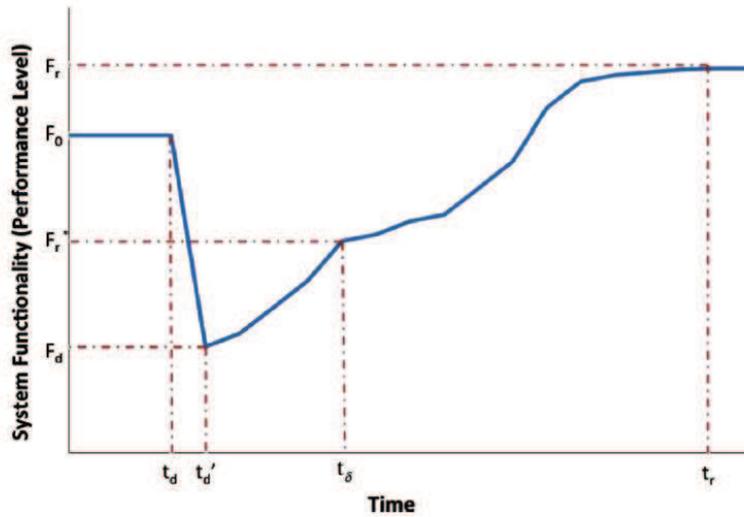


Figure 26 : Courbe de performance illustrative des temps caractéristiques. Le temps t_d correspond à un évènement brutal, t_r correspond à la phase où le système a intégré le retour d'expérience et s'est amélioré [Francis, 2014]

Francis applique ensuite sa méthodologie sur un réseau électrique fictif, en considérant le nombre de clients impactés comme mesure de performance. Cependant il ne justifie pas la façon dont il obtient la courbe de performance, et il suppose une réaction du système « réseau électrique » qui le ramène au niveau initial quasiment instantanément.

Conclusion sur les méthodes d'évaluation de la résilience

Seule l'approche d'Alsubaie propose de modéliser le comportement du système d'infrastructures pour évaluer la résilience, les autres approches se basant sur une explication de la réaction et la connaissance des experts. Pourtant Alsubaie ne distingue pas les trois phases de la résilience, alors que Toubin a bien mis en évidence l'intérêt d'obtenir une signature de ces trois capacités. Beaucoup d'approches utilisent une « courbe de performance » pour mesurer l'indicateur global de résilience. Comme Toubin l'a fait remarquer, le choix de l'indicateur de performance va influencer le score de résilience. Il s'agit donc d'utiliser la stratégie de l'opérateur (donc ses propres indicateurs) pour évaluer sa résilience. La définition de la fonction mathématique pour évaluer la résilience en fonction de la courbe de performance ne fait pas non plus consensus. Enfin l'auteur remarque que Francis a évalué la performance de l'ensemble du réseau électrique en nombre de clients perturbés, mais qu'Alsubaie parle de la performance de chaque hôpital et non pas de l'ensemble du parc hospitalier. Si le choix de l'échelle d'observation ne fait pas non plus consensus, l'auteur

souhaite mettre l'accent sur la capacité du système sociotechnique à se réorganiser à l'échelle du réseau pour faire face à une situation de crise. L'échelle du système avec des indicateurs globaux sera donc privilégiée par la suite pour l'évaluation de la résilience.

Enfin l'utilisation d'une courbe de performance implique trois possibilités :

- soit les défaillances ont été constatées sur un événement antérieur, et il s'agit alors d'une évaluation de la résilience *a posteriori* ;
- soit la courbe de performance a été simulée, ce qui suppose un modèle sociotechnique, qui intègre les prises de décision sur les allocations des ressources palliatives ou de réparation. La résilience peut alors être évaluée sur une courbe de performance *a priori*, ou plutôt « estimée ». On parlera alors de résilience potentielle ;
- soit la courbe de performance a été estimée par les opérateurs, en tenant compte d'un scénario précis et des capacités de réaction connues. Dans ce cas le tracé de la courbe ne peut pas être considéré comme exact et seuls des niveaux de performance à des instants caractéristiques peuvent être estimés avec une marge d'incertitude. Cette approche permet difficilement d'utiliser des opérateurs mathématiques tels que l'intégrale. Là encore, on parle d'une estimation et donc d'une résilience potentielle.

2.4 Analyse des manques et premiers éléments de réflexion sur les orientations à retenir pour la méthodologie développée

2.4.1 Synthèse des manques constatés dans l'état de l'art

La modélisation des effets cascade

L'état de l'art a montré que les outils de modélisation des effets cascade existants sont séparés entre ceux qui modélisent explicitement les effets cascade internes et les outils implicites qui utilisent des indicateurs fournis par les opérateurs pour les simuler. La deuxième catégorie nécessite moins de données techniques pour faire tourner un modèle, mais est moins flexible et précise que la première catégorie. Or, la première catégorie pose une difficulté pratique d'entretien de la base de données techniques, et d'hébergement, chez la sécurité civile, d'une capacité d'expertise pour cette modélisation.

Il manque donc une approche implicite capable d'approcher la flexibilité et la précision de l'approche explicite en s'appuyant sur les capacités de modélisation des opérateurs. De plus, le guide ORSEC Rétaip-réseaux soulignait l'importance de connaître les « zones d'impact » par infrastructure. Or, les outils existants –à part l'approche implicite DOMINO- ne font que représenter les infrastructures défaillantes sur une carte, mais n'exploitent pas la dimension spatiale dans leur modélisation même d'effets cascade. Il manque donc une approche implicite flexible, basée sur les capacités de simulation des opérateurs, et qui utilise la notion de zones d'impact pour modéliser les effets cascade. Pour cela, il manque également une méthode qui traduise les défaillances des infrastructures en zones d'impact, utilisables pour la modélisation des effets cascade.

Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité et de la résilience

L'évaluation de la vulnérabilité et de la résilience face à des scénarios caractérisés en intensité et en localisation a pour objectif, pour l'opérateur, d'identifier clairement ses vulnérabilités et ses capacités de gestion, ses capacités de résilience ainsi que la façon de les améliorer. La connaissance de ces indicateurs doit permettre également à l'opérateur de mieux identifier les scénarios étudiés sur lesquels les capacités actuelles de gestion ne permettraient pas d'être résilient. Nous avons vu également que l'évaluation de la vulnérabilité doit tenir compte des effets cascade provoqués par les scénarios étudiés pour être pertinente.

Les méthodes existantes de vulnérabilité sont focalisées sur un risque et un réseau, et peu prennent en compte les effets cascade. Il manque une structure d'évaluation transposable à plusieurs réseaux et plusieurs scénarios et tenant compte des effets cascade. L'aspect transposable implique que la méthode soit applicable par les opérateurs, en s'appuyant sur leur propre expertise du réseau et leurs capacités de simulations. En effet, la rencontre de plusieurs opérateurs au cours de cette thèse a permis de mettre en évidence qu'ils possédaient tous un système informatique de gestion, avec pour la plupart des capacités de modélisation de leurs flux. Nous avons vu par ailleurs l'importance de s'appuyer sur une expertise interne au réseau et non pas seulement sur une analyse externe. La forme du questionnaire est une forme simple, applicable par tous. Il manque cependant un questionnaire dont la structure et les indicateurs seraient transposables à plusieurs réseaux et à plusieurs risques.

L'évaluation de la résilience dans ce questionnaire pose la question du choix de la courbe de performance utilisée pour qualifier la résilience potentielle. Ce travail propose d'utiliser la courbe de performance estimée par les opérateurs, en tenant compte d'un scénario précis et des capacités de réaction connues. Comme souligné précédemment, cela signifie que le tracé de la courbe n'est pas exact et seuls des niveaux de performance à des instants caractéristiques peuvent être estimés avec une marge d'incertitude. Il reste donc à établir une méthode basée sur les connaissances des opérateurs, qui utilise les niveaux de performance et les temps spécifiques de réaction pour estimer à l'échelle du système les trois capacités de résilience : absorption, adaptation et réparation.

2.4.2 Choix de l'orientation sur les méthodes de modélisation des effets cascade pour la sécurité civile

Le chapitre 3 commence par s'intéresser aux causes d'effets cascade, en proposant un classement de celles-ci. La section 3.2 s'intéresse particulièrement à une cause liée aux activités même de la sécurité civile. Elle illustre le fait que derrière chaque cause se trouve de très nombreuses déclinaisons de scénarios, et qu'il est important de faire une analyse de risque spécifique à chaque cause. Pour s'affranchir de cette contrainte dans le reste du chapitre 3, nous utiliserons l'hypothèse suivante : un effet cascade est causé par une ou des défaillances d'infrastructures, quelle que soit la cause des défaillances.

Les réseaux seront considérés dans cette partie comme des systèmes uniquement techniques pour modéliser les effets cascade. Nous nous intéressons aux simulations sur des séquences

courtes (quelques heures), qui correspondent à une propagation rapide de défaillances via des liens de dépendances géographiques, physiques et cybernétiques. Nous avons supposé grâce aux retours d'expériences des différentes catastrophes qu'il était nécessaire de spatialiser les liens de dépendance. La section 3.3 s'attache à démontrer cette hypothèse. Elle montre que la construction d'une base de données orientée graphe comprenant les liens de dépendance à l'échelle du service urbain – donc de façon non spatialisée – permet d'identifier les risques d'effets cascade, mais pas de les modéliser. Elle illustre cependant le fort potentiel opérationnel d'une base de données orientée graphe, notamment vis-à-vis des requêtes réalisables avec cet outil.

C'est pourquoi la section 3.4 s'intéresse à la création d'une base de données orientée graphe à l'échelle de l'infrastructure et avec des liens de dépendances spatialisés, ainsi qu'aux limites de cette approche. Dans la mesure où chaque infrastructure est reliée aux autres indépendamment du réseau auquel elle appartient, il s'agirait là d'une approche implicite. Cependant les liens de dépendance sont connus dans ce cas uniquement en fonctionnement normal. Or la présentation des réseaux a montré que ceux-ci peuvent se reconfigurer techniquement pour absorber une défaillance. Une base de données orientée graphe n'est pas adaptée pour simuler à la volée des reconfigurations (démonstration dans la section 3.4), et il faudrait les connaître par avance afin de les inclure comme attributs des relations. La section 3.4 s'intéresse donc aux infrastructures dont on peut prévoir les reconfigurations, c'est-à-dire les zones d'impact associées, à l'avance. Elle conclut que peu d'infrastructures sont éligibles à cette approche, et il est alors nécessaire d'explorer une piste plus flexible que cette approche implicite pour modéliser les effets cascade.

La section 3.5 explore les possibilités d'utilisation des simulateurs spécifiques aux réseaux techniques pour être capable d'appréhender les reconfigurations, en minimisant les désagréments pratiques d'une approche explicite que sont la gestion d'une base de données techniques spécifiques aux réseaux, et l'entretien d'une capacité de simulation très technique au sein de la sécurité civile. C'est pourquoi cette section propose un couplage faible de ces simulateurs, avec pour lien de couplage les zones d'impact calculées par chaque simulateur. Il a l'avantage de garder la capacité de simulation sous la responsabilité de l'opérateur tout en modélisant les dépendances. Cette méthode est mise en pratique sur l'effet cascade « coupure d'électricité → coupure d'eau » afin de mettre en évidence l'intérêt de celle-ci. Le calcul successif des zones d'impact des différents réseaux nécessite une hiérarchisation de ces opérations, qui est discutée dans la section 3.5.

Enfin, le présent travail conclut cette étude des effets cascade par la modélisation des conséquences sociétales de ces zones d'impact (section 3.6), en cartographiant les enjeux sociétaux au cours de la journée –notamment l'évolution de la densité de population en région francilienne. La connaissance des enjeux est un élément de priorisation des actions lorsque les ressources alternatives ou de réparation sont insuffisantes. Leur modélisation est également un facteur de contexte pour hiérarchiser la base de données des scénarios par gravité. La modélisation de processus de décisions sur la base de ces estimations de gravité est cependant en dehors du cadre de cette thèse, et ne sera pas abordée.

2.4.3 Choix de l'orientation sur les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité et de la résilience par les opérateurs

Le présent travail souhaite développer une méthode inductive pour l'évaluation de la vulnérabilité du système. Elle s'appuiera sur les connaissances des opérateurs pour identifier, face à chaque scénario caractérisé en intensité et en localisation, la vulnérabilité matérielle et fonctionnelle de chaque infrastructure. Cette dernière tient compte notamment de la présence d'effets cascade. Puis la méthode utilisera la capacité des opérateurs à modéliser leur propre système technique pour évaluer la vulnérabilité systémique. Celle-ci est définie comme la « perte de performance du système mesurée à la fin de la réaction passive de celui-ci face à un aléa caractérisé ». N'utiliser que des indices de « vulnérabilité » (c'est-à-dire de « perte de performance ») permet de garder une approche implicite à l'échelle de l'infrastructure qui n'enferme pas l'opérateur dans une liste limitée de facteurs de vulnérabilité. Ce choix permet alors de proposer une structure transposable (questionnaire) à plusieurs risques car elle repose sur l'expertise des opérateurs. Afin de proposer des seuils de notation transposables, la performance sera évaluée selon les critères contractuels de performance des réseaux, et devra identifier le seuil de défaillance en lien avec le dispositif ORSEC RétaP'Réseaux. La méthode développée permettra aux opérateurs d'identifier leurs vulnérabilités dans une approche transposable à différents scénarios caractérisés et à différents réseaux techniques.

L'évaluation de la résilience potentielle d'un réseau technique se fait à l'échelle du système sociotechnique et non pas à l'échelle de l'infrastructure. Comme l'on parle d'une réaction de la part des opérateurs, il est là encore nécessaire de s'appuyer sur leur jugement pour appliquer la méthodologie développée. Le présent travail souhaite quantifier les trois capacités de résilience (absorption, adaptation, réparation) sur la base de critères de performances mesurés à des temps caractéristiques afin d'obtenir une signature des capacités de résilience. La combinaison « partenariat opérateur + analyse de la vulnérabilité et des capacités de résilience + méthode transposable à différents scénarios de risques » est en soi une plus-value vis-à-vis des autres méthodes existantes. Elle permettra aux opérateurs d'avoir un portrait de leurs capacités de résilience vis-à-vis de chaque scénario. Ce sera ensuite à l'opérateur de définir l'importance des scénarios à étudier en fonction d'une analyse de risque préalable (non menée dans le cadre de ce travail). Ces portraits permettront également à la sécurité civile de comprendre les points faibles et forts des différents réseaux face aux scénarios, et donc de compléter une analyse des effets cascade.

2.5 Synthèse des questionnements et structure de la thèse

Le double questionnement de ce travail de thèse se positionne vis-à-vis des besoins opérationnels : comment modéliser les effets cascade entre réseaux techniques pour mieux planifier et gérer une crise du point de vue de la coordination – la sécurité civile – et du point de vue des opérateurs de réseaux ? Comment mesurer les vulnérabilités et les résiliences des réseaux techniques face aux différents scénarios, en prenant en compte ces effets cascade ?

Chapitre 2 : Etat de l'art

L'état de l'art sur les méthodes de modélisation des effets cascade met en évidence le besoin de développer une méthodologie hybride entre les deux catégories de modélisations existantes, en insistant sur la dimension spatiale de la modélisation. Il met également en avant le besoin de développer une méthode d'analyse de vulnérabilité et de résilience complémentaire à cette modélisation des effets cascade. Une seconde partie de l'état de l'art présente les différentes méthodes existantes pour l'évaluation de la vulnérabilité et de la résilience. Celles-ci sont majoritairement construites de façon non flexible autour d'un risque donné, et il apparaît nécessaire de créer une méthode d'analyse dont la structure est transposable à plusieurs catégories de risques (questionnaire) et qui s'appuie sur les capacités de modélisation et la connaissance des opérateurs.

Le chapitre 3 s'intéresse à l'étude des effets cascade, depuis l'analyse des causes jusqu'à la modélisation des conséquences, en passant par la proposition d'une méthode de modélisation. Il commence par un classement des causes qui pourraient créer un effet cascade. La seconde section s'intéresse en particulier aux interventions des sapeurs-pompiers, membres de la sécurité civile : Quelles seraient les situations pour lesquelles les sapeurs-pompiers seraient amenés à créer des conditions propices aux effets cascade contre leur gré ? Il s'agit de cartographier ces zones d'intérêts afin d'adapter la réponse opérationnelle des sapeurs-pompiers à ce risque. Par la suite, la distinction selon les causes n'est plus utilisée : le travail se concentre sur une méthodologie de modélisation d'effets cascade causés par la défaillance d'une infrastructure, quelle que soit sa cause.

La modélisation des liens de dépendance à l'échelle du service urbain prouve dans une troisième section la nécessité de spatialiser ces liens, et d'affiner cette connaissance à l'échelle de l'infrastructure. En particulier, la quatrième section discute d'une implémentation possible de la « zone d'impact suite à la défaillance d'une infrastructure », telle que décrite par le guide ORSEC Retap'Reseaux (approche par conséquence). Réseau par réseau, quelles sont les infrastructures éligibles à cette approche, avec quelles limites techniques ? Il en résulte que l'attribution d'une zone d'impact « statique » à chaque infrastructure, en amont de toute crise et indépendamment des autres défaillances d'infrastructures, possède des limites fortes. Il manque l'expertise des gestionnaires pour évaluer au cas par cas et suivant l'ensemble des infrastructures défaillantes les zones d'impact résultantes. Cela démontre alors la faible pertinence d'une modélisation d'effets cascade à l'aide d'une base de données orientée graphe.

L'auteur propose alors une méthodologie de couplage faible entre les simulateurs de réseaux techniques, basée sur une étude successive des différents réseaux par les opérateurs (au lieu d'une résolution en parallèle pour les couplages forts), et utilisant les zones d'impact comme lien de couplage. Cette méthode, hybride entre les deux catégories existantes de modélisation des effets cascade (implicite et explicite) est illustrée dans une cinquième section sur l'effet cascade « coupure électrique → coupure d'eau potable ». Les zones d'impact successives obtenues viennent ensuite caractériser les effets cascade de chaque scénario. Ces bases de

Chapitre 2 : Etat de l'art

données géographiques ont pour objectifs d'améliorer la planification vis-à-vis de ce risque d'effet cascade, et de fournir des scénarios de référence en cas de crise.

Afin de transformer ces zones privées de ressources en enjeux à gérer pour la sécurité civile, la sixième section propose une modélisation des conséquences humaines et sociétales de ces zones d'impact. Une méthode de cartographie de ces enjeux par tranche horaire suivant le jour de la semaine illustre le potentiel d'utilisation de ces « zones d'impact » pour la sécurité civile.

La thèse se situe au croisement de différentes attentes, selon les acteurs concernés. La méthodologie précédente est destinée à aider la sécurité civile dans son rôle de coordination, et à permettre aux opérateurs d'améliorer leur planification en tenant compte des effets cascade. Cependant, l'utilisation de zones d'impact est opaque pour la sécurité civile, et il faut y ajouter des indicateurs calculés par les opérateurs permettant de mieux comprendre chaque scénario (chapitre 4) : vulnérabilités des infrastructures, mais également capacités de résilience des réseaux, et définition des seuils à partir desquels les réseaux sont en défaillance et donc où l'Etat doit compléter la réponse (dispositif ORSEC). Les opérateurs ont, eux, exprimé le besoin d'avoir une méthode d'analyse de vulnérabilité et de résilience (dans le cadre du projet Resiwater) pour le suivi et l'amélioration des capacités de résilience du système face aux menaces. Cette méthode a été créée et testée sur des réseaux d'eau, face à des scénarios de crise qu'ils ont identifiés. L'auteur explore ensuite la question de l'adaptabilité de cette méthode à d'autres réseaux techniques. Enfin l'auteur discute des avantages et limites de la méthode créée face au double intérêt opérateurs/sécurité civile, et met en perspective la complémentarité des résultats obtenus avec la méthode développée pour la modélisation des effets cascade.

3 Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

Ce chapitre 3 étudie les effets cascade depuis leurs causes jusqu'à leurs conséquences en passant par leur modélisation. Les réseaux étudiés sont des systèmes sociotechniques insérés dans un environnement possédant ses caractéristiques propres – notamment en termes d'aléas. Ce chapitre choisit de limiter l'étude des effets cascade aux liens de dépendance physiques, cybernétiques et géographiques, et exclue toute étude relative aux contraintes politiques, financières et sociétales sur la propagation de défaillance. Ce faisant, le comportement des réseaux peut être approché par des simulateurs spécifiques. Il pose également l'hypothèse d'une approche déterministe : toute infrastructure exposée et cliente d'un service défaillant sera considérée comme défaillante à son tour (effet cascade). La prise en compte des différentes vulnérabilités des infrastructures (autonomie notamment) et de la résilience des systèmes de réseaux techniques sera faite dans le chapitre 4 avec le développement d'une méthode spécifique.

Ce chapitre propose une typologie des causes de défaillances des infrastructures de réseaux techniques, pour pouvoir ensuite classer les scénarios face auxquels l'auteur souhaite tester les réseaux techniques. La deuxième section explore ensuite une cause spécifique de coupure de réseaux techniques : la mise en sécurité d'une intervention de sapeurs-pompiers (dans le cas de notre étude, la Brigade des Sapeurs-Pompiers de Paris) sur un feu, à proximité de réseaux techniques dangereux. La troisième partie s'intéresse à la modélisation des effets cascade en elle-même. Elle analyse les liens de dépendance à l'échelle du service urbain sur le territoire parisien à l'aide d'une base de données orientée graphe. Puis, elle démontre la nécessité d'analyser ces interdépendances à une échelle plus fine pour pouvoir modéliser des effets cascade et construire des indicateurs utiles pour la planification et la gestion de crise. La quatrième section étudie donc la faisabilité de cette même approche, à une échelle plus détaillée : celle de l'infrastructure. La création de cette base de données de dépendance nécessite de connaître par infrastructure sa zone de service associée, pour identifier géographiquement quelles sont les autres infrastructures dépendantes de son fonctionnement. Cette zone de service se transforme en zone d'impact en cas de défaillance.

Le lien géographique de la zone d'impact engendrée par la défaillance d'une infrastructure correspond au vecteur d'effet cascade. Or, cette étude conclut que la proposition « une infrastructure = une zone d'impact statique » n'est applicable que dans très peu de cas. Il faut en effet s'appuyer sur une modélisation de l'ensemble du réseau pour pouvoir estimer une zone d'impact associée à la liste des infrastructures défaillantes par scénario. La cinquième partie propose donc une modélisation des effets cascade qui respecte ce besoin d'utiliser les

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

simulateurs spécifiques aux réseaux techniques tout en gardant la compétence de simulation chez les opérateurs. La méthode utilise un couplage faible entre ces simulateurs via l'utilisation de zones d'impact, calculées successivement pour les différents réseaux. Sa faisabilité est prouvée sur un cas réel de coupure d'électricité dans la région de Saint-Nazaire. L'auteur a reconstruit un réseau réaliste d'eau, sur la base de la description des infrastructures existantes. Il a ensuite calculé les zones d'impact privées d'eau suite à cette coupure électrique, sur la base de simulations hydrauliques. Cela a permis de reconstruire un effet cascade entre le réseau électrique et le réseau d'eau, via l'utilisation de zones d'impact. Enfin, dès lors que la modélisation des effets cascade produit des zones d'impact, il devient possible d'évaluer de façon automatique les conséquences sociétales. Les enjeux fixes, comme les infrastructures, sont cartographiés et déjà utilisés pour quantifier la gravité des scénarios. Ce qui l'est moins en revanche, c'est la mobilité humaine et les variations de densité durant la journée. La sixième section propose une méthode d'estimation de cette variation de densité humaine (enjeux humains) pour améliorer les estimations des conséquences d'effets cascade. La structure du chapitre 3 est résumée sur la figure ci-dessous.

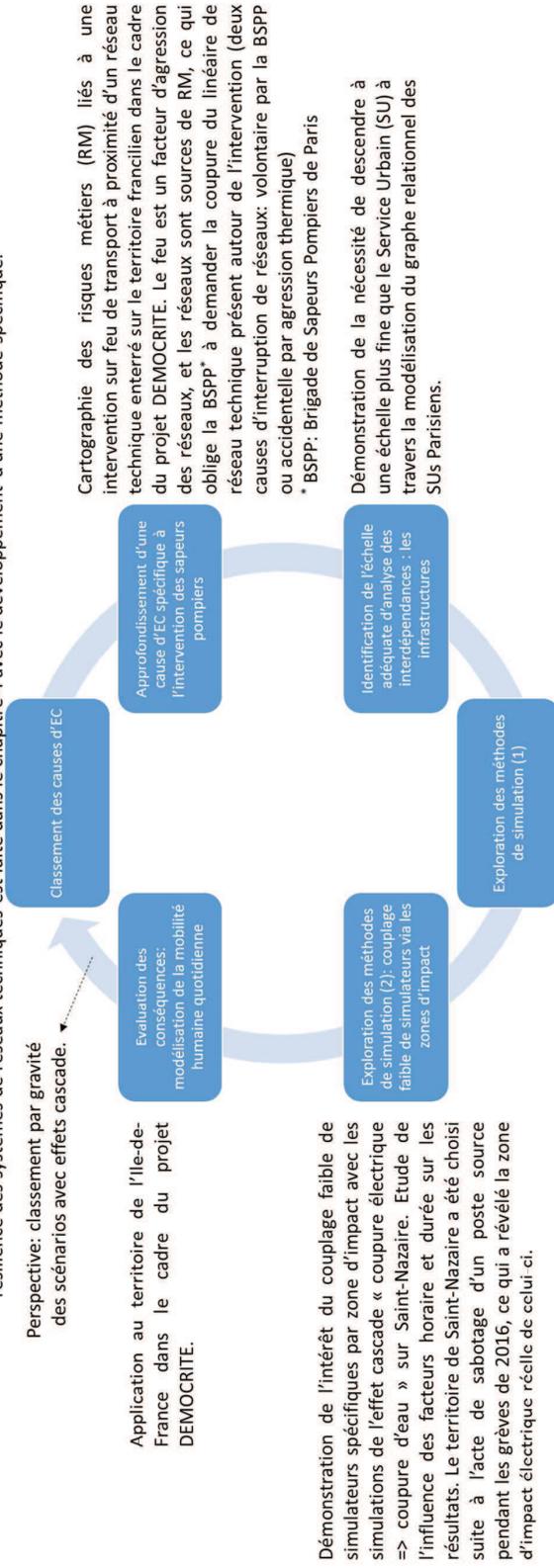
Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

Chapitre 3: Modélisation du cycle des effets cascade: apports (méthodes et outils) de la thèse pour l'aide à la planification de la gestion de crise avec un risque d'effet cascade

Hypothèses:

- Etude uniquement du système technique. Modélisation des effets cascades uniquement physiques et géographiques, sur le court terme (exclusion des réactions politiques, juridiques, assurantielles, économiques qui influencent sur le moyen terme l'évolution de la situation de crise).
- Approche déterministe et homogène: une infrastructure exposée et sensible à un effet cascade sera considérée comme défaillante si elle est touchée par un effet cascade. La prise en compte des différentes vulnérabilités des infrastructures et de la résilience des systèmes de réseaux techniques est faite dans le chapitre 4 avec le développement d'une méthode spécifique.

Perspective: classement par gravité des scénarios avec effets cascade.



Démonstration que l'hypothèse « une infrastructure défaillante = une zone d'impact statique » sans prise en compte de l'ensemble des infrastructures du réseau, hypothèse utilisée dans certaines méthodes existantes, est pertinente dans très peu de cas. Démonstration du besoin d'obtenir des zones d'impact évolutives à travers l'utilisation de simulateurs spécifiques aux réseaux.

Figure 27 : Structure du chapitre 3

3.1 Classement des causes potentielles d'effets cascade

Dans la présente section, toute cause de défaillance d'une infrastructure de réseau technique sera considérée comme « cause potentielle d'effets cascade ». L'apparition d'un effet cascade sur des systèmes essentiels à la société est un événement rare, souvent dû à une combinaison de causes. Cependant le classement des causes potentielles d'agressions des infrastructures permet dans un second temps de classer les scénarios qui seront étudiés [Grangeat, 2015].

Brilhac [Brilhac, 2009] a appliqué une analyse MOSAR (Méthode Organisée Systémique d'Analyse des Risques) sur un territoire. Il a notamment proposé une liste de 41 sources de danger auxquelles il est exposé (voir **Figure 28**). Celle-ci met bien en évidence que les ruptures de réseaux sont à la fois des causes de processus de dangers (numéros 20, 22, 23, 24) et des conséquences.

Tableau 2 - Liste non exhaustive des processus de danger proposés par la méthode (suivant les grands sous-systèmes considérés pour le territoire) (d'après [6] [7] [8] [10] [11])

Familles de risques	Index*	Événements redoutés
Risques liés aux sous-systèmes environnementaux	1	Mouvement de terrain
	2	Inondation
	3	Séisme
	4	Sécheresse
	5	Feux de forêts
	6	Avalanche
	7	Tempête
	8	Fortes précipitations
	9	Chute d'arbre, poteau, grue
Risques liés aux sous-systèmes techniques	10	Explosion
	11	Dispersion de produits toxiques
	12	Incendie
	13	Perte de confinement
	14	Accident nucléaire
	15	Rupture de barrage/digue
	16	Accident transport aérien
	17	Accident transport terrestre
	18	Accident transport maritime
	19	Centrale électrique hors service
	20	Coupure électrique générale
	21	Station de traitement de l'eau potable hors service
	22	Coupure de l'adduction en eau potable
	23	Coupure des réseaux télécoms
	24	Coupure des voies de communication

Risques liés aux sous-systèmes économiques	25	Destruction des récoltes
	26	Paralysie de la production
	27	Produits invendables
	28	Baisse des revenus
	29	Augmentation des dépenses
Risques liés aux sous-systèmes social et sanitaire	30	Violences urbaines
	31	Epidémie
	32	Canicule
	33	Criminalité - Drogue - Prostitution
	34	Attentat
Risques liés aux sous-systèmes politiques et organisationnels	35	Crise du logement
	36	Exode
	37	Fermeture d'entreprises
	38	Départ des services publics
	39	Saturation des hôpitaux
	40	Impuissance des secours
	41	Manque d'entretien des infrastructures

*La plupart des éléments de ces processus (événements, sources de danger, effets sur les cibles) ont été indexés afin de permettre plus aisément la construction de scénarii.

Figure 28 : Les 41 sources de dangers identifiées pour un territoire selon [Brilhac, 2009]

Brilhac utilise ensuite ce classement pour élaborer des scénarios d'effets cascade, en reliant les effets d'une source de danger à une cause de danger secondaire pour d'autres systèmes, comme le montre le scénario court de la **Figure 29**. Il propose dans un second temps d'intégrer des probabilités de propagation. Mais sa méthode n'a pas la dimension temporelle

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

qui intéresse ce travail, et ne distingue pas les effets cascade entre réseaux techniques, tels que ce travail les conçoit –avec une dimension de propagation relativement rapide. De plus, en analysant le système « territoire » dans sa globalité, Brillhac ne distingue pas les sources de dangers externes de celles internes aux réseaux techniques, comme le fait à l'inverse Dassens dans son étude systémique de l'analyse de risques [Dassens, 2008]. Dassens souligne également que la défaillance d'une infrastructure peut être causée par bien d'autres facteurs que des agressions physiques ou un manque de ressource (facteurs économiques, sociaux, politiques, juridiques notamment, voir la Figure 30).

Tableau 4 - Construction de scénarios				
Événement redouté	Événements initiateurs	Sources de dangers	Événements terminaux	Effets sur cibles
7	Tempête - EN_17 : Variations de température importantes	Climat	- EN_13 : Rafales - EN_16 : Foudre - EN_14 : Fortes précipitations - EN_05 : Mer très agitée - EN_32 : Chute d'arbres - EOP_07 : Routes dégradées	- Destructions et détériorations aux habitations, aux entreprises, aux ouvrages (ponts, routes, etc.) - Chute d'arbres, de grues - Chute d'objets - Toitures arrachées - Voies aériennes inutilisables - Circulation terrestre et maritime difficile - Morts, noyade, ensevelissement, personnes blessées, isolées ou déplacées
9	Chute d'arbre, poteau, grue - EN_32 : Chute d'arbre - EN_24 : Déformation du sol - EN_16 : Foudre - EN_13 : Rafales - EN_19 : Chutes de neige - EN_28 : Insectes	Grand arbre, poteau, antenne, œuvre d'art	- ET_07 : Choc - EN_03 : Création d'embâcle - EN_24 : Déformation du sol - ET_17 : Réseaux endommagés - EN_26 : Déboisement	- Destructions et détériorations aux habitations, aux entreprises, aux ouvrages (ponts, routes, etc.) - Circulation terrestre
2	Inondation - EN_14 : Fortes précipitations - EN_04 : Fonte des neiges - ET_13 : Rupture de barrage ou de digue - EN_03 : Création d'embâcle - EOP_02 : Réseau d'assainissement pluvial saturé	Cours d'eau Sols imperméabilisés	- EN_02 : Inondation - EN_01 : Ruissellement - EN_06 : Érosion - EN_08 : Coulées de boues - EN_03 : Création d'embâcles - ET_12 : Corrosion - ET_10 : Encombrement du sol - EN_10 : Pollution de l'eau	- Destructions et détériorations aux habitations, aux entreprises, aux ouvrages (ponts, routes, etc.) - Dommages au bétail, aux cultures - Endommagement, destruction de la flore et de la faune, disparition du sol cultivable, pollutions diverses, dépôts de déchets, boues, débris, etc. - Paralysie des services publics - Inondation des voies terrestres - Morts, noyade, personne blessées, isolées ou déplacées
21	Station de traitement de l'eau potable hors service - ET_06 : Pénurie d'eau - EN_10 : Pollution de l'eau - ET_12 : Corrosion - EN_24 : Déformation du sol - ET_28 : Pénurie de pétrole - ET_06 : Pénurie de matières premières - ET_18 : Perte de l'alimentation électrique	Station de traitement de l'eau potable	- EOP_01 : Traitement de l'eau défaillant - ET_27 : Perte de l'AEP	- Production d'eau potable arrêtée - Stagnation de l'eau

Figure 29 : Enchaînement de scénarios courts grâce au classement des événements initiateurs et des effets [Brilhac, 2009]

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

Tableau 3 – Liste des familles de sources de danger	
Familles des sources de danger externes	Familles des sources de danger internes
I. SPHÈRE ÉCONOMIQUE I.1. Sources de danger liées au marché et aux clients I.2. Sources de danger liées aux autres acteurs économiques I.3. Sources de danger liées aux risques financiers primaires	A. SOUS-SYSTÈME ÉCONOMIQUE A.1. Sources de danger liées aux ressources financières A.2. Sources de danger liées aux choix financiers
II. SPHÈRE SOCIALE II.1. Sources de danger liées à la société II.2. Sources de danger liées à la population	B. SOUS-SYSTÈME SOCIAL B.1. Sources de danger liées aux individus B.2. Sources de danger liées aux groupes d'individus
III. SPHÈRE POLITICO-JURIDIQUE III.1. Sources de danger liées au contexte national III.2. Sources de danger liées au contexte local III.3. Sources de danger liées au contexte législatif et normatif III.4. Sources de danger liées au contexte professionnel	C. SOUS-SYSTÈME ORGANISATIONNEL C.1. Sources de danger liées à la stratégie C.2. Sources de danger liées au management C.3. Sources de danger liées aux méthodes C.4. Sources de danger liées aux instructions
IV. SPHÈRE TECHNIQUE IV.1. Sources de danger liées au transport IV.2. Sources de danger liées aux autres activités industrielles et commerciales IV.3. Sources de danger liées aux infrastructures IV.4. Sources de danger liées aux matières et matériels	D. SOUS-SYSTÈME TECHNIQUE D.1. Sources de danger liées aux risques techniques D.2. Sources de danger liées aux risques biologiques D.3. Sources de danger liées aux risques de blessures D.4. Sources de danger liées à l'informatique et aux données D.5. Sources de danger liées à la fiabilité et la disponibilité
V. SPHÈRE ENVIRONNEMENTALE V.1. Sources de danger liées aux événements naturels V.2. Sources de danger liées à la météorologie V.3. Sources de danger liées aux risques biologiques V.4. Sources de danger liées au risque d'incendie et au rayonnement	E. SOUS-SYSTÈME ENVIRONNEMENTAL E.1. Sources de danger liées aux conditions de travail E.2. Sources de danger liées aux infrastructures E.3. Sources de danger liées aux lieux de travail

Figure 30 : Liste des familles des sources de danger [Dassens, 2008]

Ce travail, en se focalisant sur un aspect « technique » du système, met de côté un grand nombre de scénarios. Cette hypothèse se justifie par une analyse des cinétiques étudiées : les crises relatives aux effets cascade entre réseaux techniques relèvent d'événements rapides, de l'ordre de la journée, quand les problèmes économiques, juridiques ou sociaux ont une dynamique plus lente. Il faut cependant noter que ces facteurs correspondent à des vulnérabilités latentes du système sociotechnique. En effet, une ambiance dégradée dans une entreprise n'incitera pas les employés à travailler en heures supplémentaires en temps de crise, et la gestion de ce personnel n'en sera que plus difficile. La situation pourrait alors évoluer de crise abrupte (déclenchée par un événement avec une cinétique instantanée et une identification claire) à une crise de type cumulative, dont l'identification des causes est floue et peu spécifique [Dautun, 2007].

Le présent travail de thèse s'intéresse à l'ensemble des scénarios (événements initiateurs) causant des dégradations matérielles aux infrastructures ou aux scénarios de défaillance de réseaux techniques provoquant des effets cascade. Le classement de Rey (Table 12) correspond à ces limites et reprend la distinction entre les causes de défaillances internes aux réseaux techniques et externes, propres au territoire [Rey, 2015]. Il décrit uniquement des perturbations internes subies, c'est-à-dire qu'il ne prend pas en compte les défaillances statistiques (défauts, mauvaise maintenance, vieillissement,...) mais se concentre sur les conditions « logistiques » et matérielles qui empêchent la réalisation de la fonction de l'infrastructure. Cependant Rey ne cite pas les agressions que peuvent subir les réseaux techniques enterrés, notamment lors de travaux sur la voirie, ou bien lors de feux de transports (véhicules ou wagons de fret) à proximité. L'auteur utilisera le classement de Rey pour catégoriser les scénarios initiateurs auxquels seront soumis les modèles des réseaux techniques, en y ajoutant, dans les perturbations extérieures, les agressions des réseaux techniques au niveau de leur linéaire.

Table 12 : Classement des perturbations pouvant impacter un TcAE : Territoire composé d'Activités Essentielles [Rey, 2015]

Perturbations externes	Perturbations internes subies par le système
<ul style="list-style-type: none"> • Catastrophe naturelle/environnementale/sanitaire ; • Accident industriel ; • Menaces intentionnelles ; • Une perte ou une surabondance d'une ressource de l'environnement du TcAE utilisée comme entrée ou contrainte d'une Fonction Essentielle (FE) ou Fonction d'Association (FA) et support d'un élément essentiel • <i>Ajout de l'auteur : agression accidentelle du linéaire des réseaux</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Une perte ou une surabondance d'entrée (sauf ressource de l'environnement du TcAE) ; • Une perte de support (sauf ressource de l'environnement du TcAE) ; • Une perte de contrainte (sauf ressource de l'environnement du TcAE) ; • Un flux de danger émis par un élément essentiel ; • Une perte d'activité d'un élément essentiel réalisant une fonction essentielle ou d'association.

3.2 Approfondissement d'une cause d'effet cascade : agression accidentelle du linéaire des réseaux et coupure préventive pour une intervention en sécurité des sapeurs-pompiers sur feux de transport

Cette section propose d'approfondir une cause de perturbation externe parmi celles identifiées précédemment, à savoir l'agression du linéaire d'un réseau technique. Ce travail montre l'importance de son étude. Les risques d'incendie liés aux transports ne sont pas homogènes sur le territoire. Les réseaux routiers et ferroviaires de fret concentrent les aléas de feux de véhicules (véhicule ou camion) ou de feux de wagons. Pour franchir les obstacles présents, ces réseaux utilisent des infrastructures (tunnels ou ponts) qui peuvent héberger dans leur chaussée ou leur plafond des réseaux techniques. La présence des réseaux techniques suivants à proximité d'un incendie de transport, entraîne à la fois un risque d'agression du linéaire par rayonnement, et un risque professionnel supplémentaire pour les sapeurs-pompiers : pipelines de gaz ou d'hydrocarbures, électricité haute et très haute tension, réseau vapeur de la CPCU (Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain, pour le territoire francilien).

La figure ci-dessous récapitule les normes minimales d'enfouissement des réseaux. L'intensité du rayonnement thermique dégagé par le feu est diminuée par le sol avant d'atteindre les réseaux. Cependant, lorsque l'incendie prend place dans un tunnel (ou sous un pont) avec des canalisations techniques qui passent dans le plafond de celui-ci (ou respectivement dans la chaussée du pont), alors les réseaux techniques seront fortement vulnérables à un incendie de transport. Le rayonnement prolongé produit par un incendie en milieu semi clos peut endommager les réseaux techniques et provoquer un risque professionnel pour les primo-intervenants. On est donc là face à une double cause potentielle de coupure du réseau : une dégradation due au rayonnement (agression du linéaire du réseau) ou une coupure volontaire pour mettre en sécurité les primo-intervenants s'ils l'estiment nécessaire. C'est dans une optique d'analyse des risques métiers que l'auteur a pu obtenir les

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

données nécessaires à la cartographie du risque d'agression thermique des réseaux techniques enterrés sur le territoire francilien.

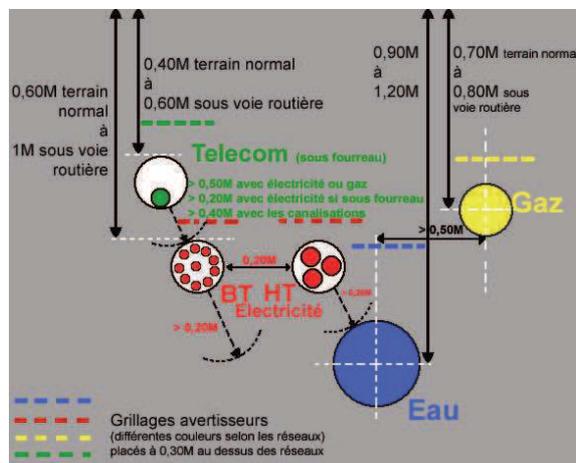


Figure 31 : Normes minimales d'enfouissement des réseaux [Visioreso, 2015]

Table 13 : Risques métiers associés au déclenchement d'un incendie dans un tunnel et à la présence d'un réseau technique dans le plafond de celui-ci [BSPP 118.2, 2012]

Réseau	Risque métier à proximité d'incendie
Electricité HT et THT	Risque d'électrocution lié à l'extinction par lance incendie. Le chef de détachement doit demander l'intervention d'une équipe RTE pour couper la ligne.
Electricité liée aux voies ferrées	Ce risque professionnel est déjà pris en compte.
Réseau vapeur	Le réseau est à minima à une pression de 5 bars. Le rayonnement de l'incendie peut provoquer une montée en pression rapide de la vapeur, avec potentiellement un dégagement brutal de vapeur.
Réseau gaz	Le rayonnement de l'incendie peut déformer la structure et provoquer des fuites de gaz. En présence d'incendie, celles-ci peuvent créer un feu de classe C.
Réseau hydrocarbures	Le rayonnement de l'incendie peut provoquer une rupture de structure occasionnant des fuites. Soit la fuite occasionne un jet dont les gouttelettes peuvent s'enflammer, soit la fuite prend la forme d'une nappe dont les vapeurs peuvent s'enflammer (feu de nappe, feu de classe B).

La prise en compte des risques métiers est importante pour les opérationnels et peut engendrer des effets très importants. En 2001 à Baltimore, un train transportant du polypropylène a déraillé dans un tunnel et le chargement s'est enflammé. Les primo-intervenants ont pris la décision de ne pas attaquer le feu car les conditions d'intervention étaient très difficiles et qu'il n'y avait pas de risques d'explosion. Au-dessus de ce tunnel se trouvait dans la

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

chaussée une canalisation d'eau de 1 m de diamètre en fonte qui a cédé sous l'effet de la chaleur, causant une inondation de 151 000 mètres cube d'eau dans les rues de la ville [NTSB, 2001]. Des câbles électriques ont également été endommagés, coupant l'électricité à 1200 bâtiments. Plusieurs lignes optiques majeures (trafic de données à l'échelle régionale) ont également été altérées [FRA, 2005]. Cet événement montre qu'il est nécessaire de s'intéresser aux réseaux techniques lors de feux de transports. L'auteur souligne cependant que l'embrasement de véhicules dans un tunnel reste un événement statistiquement exceptionnel : il est de l'ordre d'un véhicule tous les milliards de véhicules par kilomètre de tunnel considéré [AIPCR, 1999]. De plus, la coupure d'un linéaire de réseau n'entraîne que très rarement un effet cascade : les réseaux techniques sont très souvent conçus – par leur topologie – pour absorber la perte d'un linéaire. En revanche, la coupure simultanée de plusieurs linéaires – et donc l'embrasement simultané dans plusieurs zones sensibles ou au voisinage de plusieurs linéaires – doit être un facteur d'alerte pour les primo-intervenants sur la possibilité d'un effet cascade. Au vu de la très faible probabilité de ces embrasements accidentels localisés à ces points spécifiques, il s'agirait là plutôt de scénarios malveillants. Il est donc important de s'attacher à cartographier par avance ces zones présentant un risque métier.

Il est possible de cartographier les zones sensibles (tunnels, embrasement sous pont) qui croisent le linéaire de réseaux techniques indépendamment des scénarios d'embrasement. La connaissance de ces zones a trois objectifs complémentaires :

1. L'identification méthodique de zones présentant des risques métiers pour les primo-intervenants (terme technique désignant les sapeurs-pompiers engagés sur l'intervention) justifie la demande d'informations complémentaires auprès des opérateurs sur le risque réel présent lié aux réseaux techniques dangereux (profondeur d'enfouissement, etc.).
2. La cartographie de ces zones dans le Moteur de Recherche de Solutions d'Alerte (MRSA) de la BSPP (Brigade de Sapeurs-Pompiers de Paris) peut permettre de modifier la réponse opérationnelle dès réception de l'alerte (adaptation au risque professionnel identifié), sans attendre l'arrivée sur site.
3. L'intégration de ces zones dans le MRSA peut permettre à termes de constituer un système d'alerte précoce : la déclaration de plusieurs sinistres en simultané sur ces zones croisant un même réseau technique doit être un signal d'alarme sur un risque fort d'effets cascade.

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet DEMOCRITE (référence ANR ANR-13-SECU-0007-01). Les codes ArcGIS (toolboxes) développés permettant d'identifier automatiquement ces zones sur la base des données BSPP – afin de les maintenir à jour – ont été implémenté avec satisfaction dans le SIG de la BSPP. Ils ont également été valorisés par des rapports d'analyse fournis à la sécurité civile [Grangeat, DEMOCRITE, cartes, 2015] [Grangeat, DEMOCRITE, méthode, 2015]. Le paragraphe suivant présente la méthode et les hypothèses géographiques faites pour appliquer cette démarche innovante (nous n'avons pas trouvé d'approches équivalentes) sur le territoire francilien.

3.2.1 Méthode d'identification des zones présentant un risque d'agression accidentelle du linéaire de réseaux et zones de risque métier

Actuellement, la profondeur des réseaux techniques n'est pas disponible dans les bases de données géographiques de la BSPP. Dans la mesure où la profondeur n'est pas connue, tous les croisements des tunnels et des ponts avec un réseau technique dangereux seront analysés. Les croisements pertinents devront être approfondis ultérieurement en demandant aux opérateurs la profondeur effective de leur réseau sur ces zones afin de confirmer ou d'infirmier la présence d'un risque professionnel.

Les tunnels routiers et ferroviaires de fret constituent des zones d'aléa connues *a priori*. Mais ce ne sont pas les seules situations dangereuses. Les ponts routiers ou ferroviaires au-dessus de routes principales ou au-dessus d'axes de fret sont également des infrastructures utilisées par les réseaux techniques pour franchir ces axes majeurs. Le croisement des zones sensibles avec les plans en 2D des réseaux techniques permet d'attribuer à chacune de ces zones les risques professionnels potentiels en présence, certaines cumulant plusieurs réseaux techniques. Le recensement de ces zones et leur documentation dans le moteur d'analyse de solutions d'urgence de la BSPP a pour but, à terme, de donner au COS (Commandant des Opérations de Secours) la possibilité de mieux appréhender les risques présents sur l'intervention.

Les points ci-dessous justifient le choix des routes et des voies ferrées de fret comme vecteur d'aléa incendie.

- Les routes : Les retours terrains ont montré l'existence de transports illégaux dans la capitale, dont du transport de matière dangereuse et notamment d'hydrocarbures. Le risque d'embrassement de véhicules sera donc considéré comme homogène sur tout le territoire BSPP. De plus, l'embrassement de véhicules roulant au GPL constitue un aléa incendie estimé comme homogène sur les routes du territoire BSPP.
- Les voies ferrées : Cette étude s'intéresse à des incendies prolongés (présence de combustible). Ce sont donc les voies de fret qui vont être étudiées et non les voies ferrées de transport de personnes. Pour la même raison que pour les routes, il n'y aura pas de distinction entre les zones autorisant le TMD et les zones l'interdisant.

Hypothèses d'analyse des risques professionnels

- La seule infrastructure technique qui peut passer au-dessus d'une voie de fret (hors tunnel de fret) est une voie routière. Cette hypothèse correspond en réalité à une limite de connaissance : les hauteurs relatives au sol des voies ferrées entre elles ne sont pas disponibles dans la base de données, et elles sont considérées comme étant toutes sur le même plan. C'est une limite du modèle : une voie ferrée (tram par exemple) pourrait passer au-dessus d'une voie de fret. De cette hypothèse, on déduit l'hypothèse suivante.

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

- Lorsqu'un réseau technique croise une voie ferrée de fret, il existe deux options :
 - Soit il existe une voie routière qui passe au-dessus de la voie ferrée à cet endroit, et le réseau technique est supposé traverser la voie ferrée au-dessus des wagons de fret – donc est potentiellement exposé à un embrasement d'un wagon de marchandises.
 - Soit il n'existe pas de pont routier à cet endroit, et le réseau technique est supposé traverser en souterrain la voie ferrée – donc est supposé moins craindre un embrasement de wagons de fret que dans le premier cas.
- Les seules infrastructures techniques qui peuvent passer au-dessus d'une voie routière sont : une autre voie routière ou une voie ferrée (de tous types et non pas exclusivement de fret).

Définition des zones d'étude par type d'intervention

Les trois premières catégories de zones d'étude concernent l'aléa « feu de véhicule ». Les deux dernières catégories concernent l'aléa « feu de wagon de fret ».

- Les tunnels routiers, c'est-à-dire toutes les routes de niveau strictement négatif. On suppose qu'une route a un niveau négatif pour passer sous un obstacle.
- Les croisements routiers avec un enjambement routier sous la forme d'un pont. Les routes croisant un tunnel routier sont exclues de cette catégorie car déjà étudiées dans la première catégorie.
- Les ponts ferroviaires de tous types (et non pas exclusivement de fret) au-dessus des routes.
- Les tunnels ferroviaires de fret.
- Les ponts routiers au-dessus des voies de fret.

Liste des données d'entrée utilisées sur l'ensemble des modèles

- Le linéaire des routes avec un champ sur le niveau des routes (positif, négatif), la largeur, la nature des routes et l'importance de celles-ci. La base de données *BDTOPO IGN* convient très bien à cette analyse [IGN, BDTPOPO 2015].
- Le linéaire des ponts ferroviaires. Il est disponible dans les bases de données *SNCF Infra* [SNCF Infra, RGI, 2014].
- Le linéaire des tunnels de fret. Il est disponible dans les bases de données *SNCF Infra*.
- Le linéaire des lignes de fret. Il est disponible dans les bases de données *SNCF Infra*.
- Le linéaire des réseaux d'électricité HT et THT avec un champ décrivant le libellé des lignes et un champ distinguant les lignes électriques enterrées.
- Le linéaire des réseaux gaz et vapeur. Nous n'avons pas eu accès au linéaire du réseau hydrocarbures.

Résultat attendu

Les zones présentant un risque professionnel potentiel seront présentées sous forme de polygones avec les attributs ci-dessous.

Table 14 : Attributs des zones sensibles présentant un risque professionnel potentiel

Aléa	Origine	Attributs
	Tunnels routiers	
Feu véhicule	Croisements routiers	Nombre et nature des réseaux techniques en présence.
	Ponts de fret au-dessus de routes	
Feu wagon	Tunnels ferroviaires	
	Ponts routiers au-dessus des voies ferrées de fret	

Discussions autour de la qualité des données

Toutes les données disponibles à la BSPP sur les réseaux techniques sont sous forme linéaire. Lorsque la largeur des routes ou des voies de fret n'est pas connue, une valeur par défaut est attribuée : 4,50 m pour les routes à double sens, et 6,30 m pour les voies ferrées. La première valeur est justifiée par la valeur moyenne des largeurs de routes connues. La dernière valeur correspond au standard international de l'Union Internationale Chemins de fer (UIC) qui a fixé un gabarit à 3,15 m pour dimensionner les obstacles (tunnels et ponts) sur les voies de fret. On suppose que le linéaire des voies ferrées correspond sur le terrain à au moins deux voies pour permettre le croisement de trains, ce qui amène à une largeur de 6,3m. Les valeurs par défaut sont paramétrables dans chaque interface utilisateur des modèles de la toolbox ArcGIS fournie à la BSPP.

Articulation des modèles développés dans la toolbox DEMOCRITE

Neuf modèles ont été développés dans la toolbox ArcGIS pour obtenir les zones présentant un risque professionnel pour les interventions « feux de véhicule » ou « feux de fret ». Leur enchaînement est présenté dans la figure ci-dessous. Elle a pour but d'aider l'utilisateur à comprendre l'enchaînement des modèles et les données utilisées pour chacun. La **Figure 32** est complétée par une description des modèles dans la Table 15. Deux modèles ont nécessité l'établissement d'hypothèses supplémentaires pour obtenir les polygones désirés : les croisements routiers avec ponts et les ponts routiers sur fret. Ils sont détaillés en Annexe 4.

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

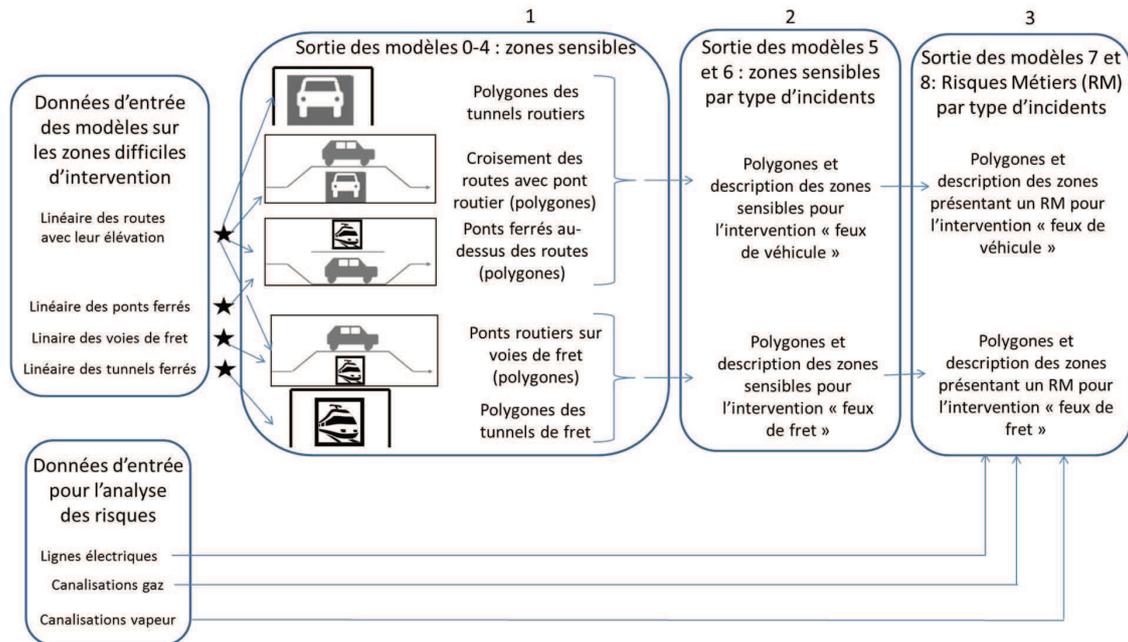


Figure 32 : Enchaînement des modèles développés dans la toolbox DEMOCRITE

Les modèles 0 et 2 sont relativement simples car les localisations des objets recherchés existent déjà dans les données d'entrée, il suffit de reconstituer leur emprise. Ce n'est pas le cas pour les modèles 1 et 4, dont les limites géomatiques sont expliquées dans l'Annexe 4. En résumé, l'utilisation d'intersections de zones tampons peut générer des erreurs dans le modèle 1, conduisant à surestimer le nombre de zones sélectionnées dans les modèles 1 et 4. Cependant ces zones erronées sont, par la nature de l'erreur, de très faible étendue, et elles ont statistiquement très peu de risques de croiser le linéaire d'un réseau technique, et donc d'être sélectionnées par les modèles 5 à 8. La distinction des zones erronées du modèle 1 ne peut se faire malheureusement que de façon manuelle et au cas par cas. La non connaissance de la largeur des ponts routiers au-dessus des voies de fret oblige le modèle 4 à ne produire que des zones d'intérêts avec une largeur minimum. Cela fait craindre, lors de l'intersection avec les réseaux dangereux, de ne pas pouvoir identifier les réseaux situés en bord d'infrastructure. Une fois les résultats des modèles 0 à 4 obtenus, les modèles 5 à 8 correspondent à des opérations d'intersections relativement classiques, et ils ne seront pas détaillés dans ce travail.

Table 15 : Liste des modèles de la toolbox DEMOCRITE

Nom	Fonction
0TunnelsRoutiers ¹	Identifier toutes les routes de niveau strictement négatif (hors voies piétonnes/cyclables). Créer les polygones de longueur et largeur correspondante aux tunnels.
1CroisementsRoutiersPonts	Identifier les croisements routiers avec ponts routiers. Créer les polygones de longueur et largeur correspondant à l'intersection de la route et du pont routier.
2PontFerroviaireSurRoute	Identifier les ponts ferroviaires au-dessus des routes (pont ferroviaire de tous types et non pas exclusivement de fret qui croisent les routes de niveau 0). Créer les polygones de longueur et largeur correspondant à l'intersection du pont ferroviaire et de la route.
3TunnelsFret	Représenter l'emprise des tunnels ferroviaires de fret. Créer les polygones de longueur et largeur correspondante aux tunnels.
4PontRoutierSurFret	Identifier les ponts routiers au-dessus des voies de fret. Créer les polygones de longueur et largeur correspondant à l'intersection de la route et du pont routier.
5AleaVehicules	Combiner les sorties entre les trois zones d'intérêts pour l'aléa embrasement de véhicule : les tunnels routiers (modèle 0), les croisements de routes avec pont routier (modèle 1) et les ponts ferroviaires au-dessus de route (modèle 2). Le résultat servira de couche de référence pour le modèle 7 qui analyse les risques professionnels liés aux réseaux techniques pour des interventions «embrasement de véhicules».
6AleaWagonsFret	Combiner les sorties entre les deux zones d'intérêts pour l'aléa embrasement de wagons de fret : les tunnels de fret (modèle 3) et les ponts routiers au-dessus de voies de fret (modèle 4). Le résultat servira de couche de référence pour le modèle qui analyse les risques professionnels liés aux réseaux techniques pour des interventions embrasement de wagons de fret.
7RM_vehicules	Attribuer à chaque zone sensible liée à l'aléa « embrasement de véhicules » la présence et le nombre de réseaux techniques.
8RM_wagons_fret	Attribuer à chaque zone sensible liée à l'aléa «embrasement de wagons de fret» la présence et le nombre de réseaux techniques.

3.2.2 Avantages opérationnels, statistiques et conclusion sur les résultats de la méthode

Les modèles développés avec ArcGIS 10.3 ont permis de cartographier les zones présentant un risque professionnel potentiel face au risque de feu de transport. La connaissance de la

¹ La programmation commence classiquement par zéro et non par 1.

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

profondeur des réseaux techniques permettrait d'affirmer/d'écarter les risques métier sur ces zones. Ces cartes constituent dans un même temps un outil d'alerte si plusieurs incidents se produisaient dans ces zones spécifiques. Les résultats obtenus sont différenciés par type d'intervention (embrasement de wagons de fret ou embrasement de véhicules), par nombre et nature des réseaux techniques en présence et par la nature de la zone retenue. Ces résultats ont été obtenus grâce à neuf modèles, sur la base de sept couches d'objets linéaires (données d'entrée) : le linéaire des routes avec des champs niveau/largeur/nature, le linéaire des lignes de fret, des tunnels de fret et des ponts ferroviaires et enfin le linéaire des trois réseaux techniques électricité HT/THT, gaz et vapeur. Cette méthode présente l'avantage d'être transposable à tous les territoires pour lesquels les données précédentes sont disponibles.

Les résultats sont donnés ici sous formes de statistiques de zones présentant un risque professionnel, mais aucune carte ne sera fournie. En effet, la cartographie de ces zones présentant un risque professionnel et donc une cause potentielle d'effets cascade a été jugée comme sensible, et sa consultation est donc réservée uniquement aux partenaires du projet DEMOCRITE.

Malgré la prudence qui doit entourer l'utilisation des statistiques de propension des zones sensibles à présenter un risque professionnel, il est intéressant de souligner ces ordres de grandeurs [Grangeat, 2015, b, c], [Grangeat, 2016, a, a*] [Grangeat, 2016, e]. La BSPP intervient sur un territoire de 850 km² avec un centre urbain très dense (Paris). Sur les zones sensibles à l'embrasement de véhicules, 7 % croisent un réseau technique provoquant un risque professionnel. Parmi ces zones, on compte environ 500 croisements avec un réseau électrique HT/THT enterré, 150 avec une canalisation de gaz, 100 avec un réseau vapeur (Table 16). Environ 50 zones sensibles à l'embrasement de véhicules croisent 2 réseaux techniques en même temps. Sur les zones sensibles à l'embrasement de fret, bien moins nombreuses que les zones sensibles aux feux de véhicules, 10 % croisent un réseau technique (Table 17). Parmi celles-ci, 60 zones croisent un réseau électrique HT/THT enterré, 20 une canalisation de gaz, et 20 un réseau vapeur. La comparaison de ces chiffres avec la superficie du territoire permet de se rendre compte de la faible densité de ces zones dangereuses.

La fréquence des types de zones sensibles par réseau technique et par type d'évènement est également intéressante à noter. Le nombre d'infrastructures routières sur le territoire d'Ile-de-France explique que 85 % des zones d'interventions sensibles concernent l'incident « aléa de véhicule », avec une majorité de croisements routiers avec ponts. Cependant, il est plus probable que les tunnels routiers ou les ponts ferrés au-dessus de routes abritent des réseaux techniques. Environ 95 % des zones sensibles à l'aléa « embrasement de fret » sont des ponts routiers au-dessus de ces voies. La probabilité des zones sensibles à cet aléa de croiser un réseau électrique n'est pas dépendant de leur nature. Il n'est pas possible de conclure sur les deux autres réseaux au vu de leur faible nombre de croisements.

Cependant quelques limites sont à souligner. Elles sont dues à la fois aux contraintes des traitements géographiques, mais également à la difficulté de traiter des données dont la description n'est pas exhaustive. Il est difficile de quantifier le nombre de zones qui n'ont pas

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

été répertoriées par le modèle. Chaque limite géomatique a été présentée et justifiée dans l'Annexe 4. Ces limites constituent des voies d'amélioration de cet outil de recherche automatique. Le relativement faible nombre de zones de risque professionnel potentiel, tel que présenté ci-dessous, permet d'envisager une vérification au cas par cas. Une enquête sur le terrain et auprès des opérateurs concernés permettra ensuite, dans un second temps de confirmer ou d'infirmer la présence d'un risque professionnel sur les zones retenues par l'outil DEMOCRITE développé sous ArcGIS 10.3.

Table 16 : Répartition des réseaux techniques sur les zones présentant un risque professionnel, selon leur nature [Grangeat, 2016, a, a*]

Zones d'interventions sensibles concernant l'incident «feu de véhicule » présentant un risque professionnel	Electricité	Gaz	Vapeur
Nombre approximatif	500	150	100
Tunnel	20 %	30 %	30 %
Ponts ferrés sur route	10 %	20 %	10 %
Croisements routiers avec ponts	70 %	70 %	60 %
Zones d'interventions sensibles concernant l'incident «feu de fret » présentant un risque professionnel	Electricité	Gaz	Vapeur
Nombre approximatif	60	20	20
Tunnel	4 %	6 %	20 %
Ponts routiers sur voies de fret	96 %	94 %	80 %

Table 17 : Propension des zones sensibles à l'aléa «feu de véhicule » ou «feu de fret » à croiser un réseau technique [Grangeat, 2016, a, a*]

Propension des zones sensibles à l'aléa «feu de véhicule » à croiser un réseau technique, selon leur nature	Electricité	Gaz	Vapeur
Tunnel	10 %	1 %	4 %
Ponts ferrés sur route	10 %	8 %	3 %
Croisements routiers avec ponts	4 %	1 %	< 1%
Propension des zones sensibles à l'aléa «feu de fret » à croiser un réseau technique, selon leur nature	Electricité	Gaz	Vapeur
Tunnel	7 %	3 %	13 % (peu de zones initiales, donc peu représentatif)
Ponts routiers sur voies de fret	6 %	2 %	2 %

La cartographie des zones où une intervention feu risque de créer une interruption de réseau démontre qu'il est possible dans certaines configurations d'anticiper les situations propices à

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

créer un effet cascade. Il serait intéressant d'approfondir par ailleurs les autres catégories de causes telles que proposées dans le paragraphe 3.1 en perspective de ce travail de thèse. Une analyse déterministe comme celle proposée ici n'est pas adaptée aux autres études des causes, et il faudrait développer une approche spécifique à chacune de celles-ci. Le paragraphe suivant s'intéresse quant à lui à la modélisation des effets cascade en eux-mêmes. Afin de généraliser l'étude des effets cascade, le déclenchement de ceux-ci sera vu comme la conséquence de la défaillance d'une ou plusieurs infrastructures, et non pas la conséquence directe de l'évènement initiateur (cause réelle). L'étude de la vulnérabilité et de la résilience des effets cascade fera dans le Chapitre 4 le lien entre l'évènement initiateur et la défaillance d'une infrastructure.

3.3 Limites d'une modélisation d'effets cascade à l'échelle du service urbain par une base de données orientée graphe

Le travail précédent a souligné à plusieurs reprises l'intérêt pour la sécurité civile de mieux connaître les effets cascade à l'échelle de l'infrastructure. Ce paragraphe se veut être une démonstration de la nécessité de descendre à cette échelle pour avoir une modélisation qui présente une utilité pour les opérationnels.

Pour cela, l'auteur se base sur les données récoltées par Toubin [Toubin, 2014] à l'échelle du service urbain (donc à l'échelle globale du réseau technique) auprès des opérateurs. Elles caractérisent les liens entre Services Urbains (SUs) et quantifient leur importance. Nous avons ensuite reconstitué le système relationnel entre les SUs sous une Base de Données Orientée Graphe (BDOG) appelé Neo4J. Cette modélisation présente un intérêt fort pour comprendre « l'écosystème des dépendances » dans lequel évoluent les opérateurs [Grangeat, DEMOCRITE, Neo4J, 2015] car elle fait ressortir les acteurs centraux et quantifie leur importance (nombre de dépendances directes et indirectes par exemple). Pour autant, l'analyse des relations à cette échelle macro – c'est-à-dire sans descendre jusqu'aux infrastructures – ne fournit pas d'indicateurs utiles pour la gestion de crise ou la planification face aux effets cascade. Par exemple, lorsque le graphe de relations identifie la dépendance aux réseaux de transports comme majeure pour le fonctionnement des SUs, il ne permet pas de distinguer par infrastructure quelles sont les lignes de transports les plus importantes. Cela signifie par exemple qu'Eau de Paris est déclarée comme dépendante du fonctionnement de l'ensemble des lignes de métro. Or si l'on regarde la localisation du siège d'Eau de Paris, son fonctionnement ne sera pas influencé de façon homogène selon les lignes de métro défaillantes.

Ce paragraphe montre ainsi qu'une Base de Données Orientée Graphe (BDOG) à l'échelle des SUs est un outil de compréhension du territoire, mais qu'il est insuffisant pour modéliser les effets cascade. En démontrant la nécessité de descendre à l'échelle inférieure d'analyse (l'infrastructure), ce paragraphe prouve la nécessité de spatialiser les liens de dépendance entre les infrastructures, car celles-ci ont une zone de desserte spécifique sur le territoire. Les requêtes présentées ici illustrent cependant le potentiel opérationnel de la constitution d'une BDOG à l'échelle de l'infrastructure.

3.3.1 Présentation de la base de données orientée graphe et des données sur les services urbains

Neo4J (www.neo4j.org) est une base de données orientée graphe, c'est-à-dire qu'elle stocke à la fois les entités caractérisées par des attributs (nœuds du graphe ou services urbains dans notre cas) et également les relations caractérisées (attributs) qui lient ces entités entre elles (arcs du graphe). Ces entités peuvent être des personnes, des groupes, des services, des entreprises, etc. Dans le cadre de cet exemple simple, il existe seulement un type de relation : « NEEDS », qui symbolise les besoins d'un service urbain pour fonctionner. On pourrait étendre cette analyse à des relations de type « contrôle », « valide », etc. Les requêtes exécutées par Neo4J sont en Cypher. Elles fonctionnent toutes sur la même architecture :

MATCH "service urbain ou relation" WHERE "condition" RETURN « le résultat souhaité: liste de propriétés, somme de propriétés sur l'ensemble des relations, description des services urbains; etc. »

Vocabulaire : (Nœud 1) –[relation1] ->(Nœud2) forme un chemin comprenant deux nœuds et une relation.

Toubin [Toubin, 2014] décrit les dépendances entre services urbains de la ville de Paris face au scénario de la crue centennale de la Seine. Ce sont ses données qui seront utilisées dans ce paragraphe. Elles proviennent des ateliers collaboratifs entre les services urbains organisés dans le but d'évaluer et d'améliorer la résilience de la ville de Paris sur les aspects techniques et organisationnels. Le Table 18 liste les 18 services urbains (SU) concernés. Afin de recenser les liens de dépendances de ces services vers des organisations non rencontrées, 5 services « passifs » ont été créés (Voirie, Autres syndicats d'eau, Hydrocarbures, Autres transports et Autres opérateurs).

Table 18 : Services urbains étudiés dans [Toubin, 2014]

N°	Services urbains	Services produits	N°	Services urbains	Services produits
1	ERDF	Electricité	13	PC Lutèce	Régulation trafic
2	GRDF	Gaz	14	EVESA	Eclairage
3	CPCU	Chauffage	15	Fonctionnelle	Viabilité
4	Climespace	Climatisation	16	Voirie	Déplacement
5	Hydrocarbures	Carburants	17	RATP bus	Transport
6	Eau de Paris	Eau potable	18	RATP metro	Transport
7	Autres syndicats	Eau potable	19	Autres transports	Transport
8	SAP	Assainissement	20	Orange fixe	Téléphone
9	SIAAP	Assainissement	21	Orange mobile	Mobile
10	Propreté	Collecte déchets	22	Orange internet	Internet
11	SYCTOM	Traitement déchets	23	Autres opérateurs	Télécommunications
12	Véolia	Transport déchets			

Toubin a caractérisé les dépendances (existence et importance) entre services urbains. Le résultat est reporté sur la **Figure 33**. Sur celle-ci, il faut lire les dépendances en vertical : par

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

exemple, le service n°1 dépend des services n°3, 5, 6, 7, 11, 16, 21 et 23 pour fonctionner. Cette matrice sert de base de données pour notre analyse sous Neo4J et pour quantifier l'importance relative des différents SUs, en termes de dépendances directes et indirectes.

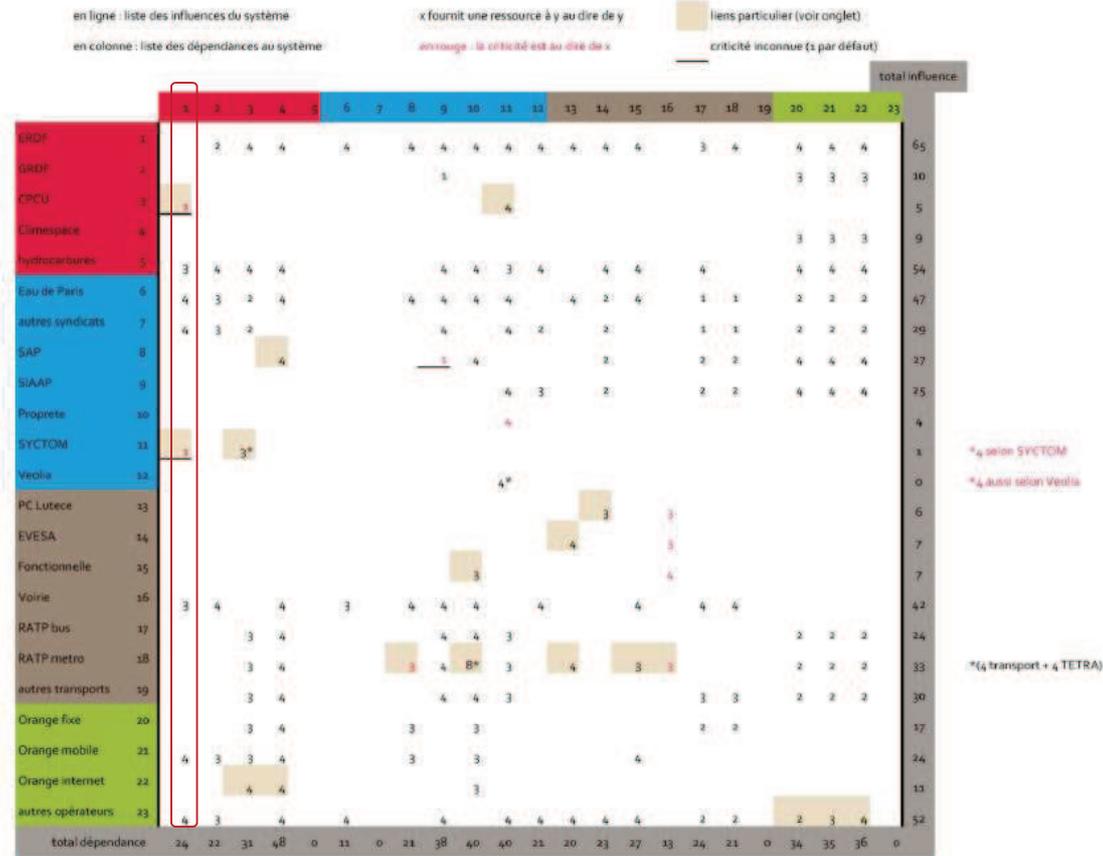


Figure 33 : Dépendances entre services urbains parisiens, évaluation de leur importance [Toubin, 2014]

Les relations proviennent des portraits (description détaillée) des services urbains, réalisés sur la base d'entretiens avec les gestionnaires de ces services responsables de la gestion du risque inondation. Ils sont plus approfondis que la seule notion « d'importance » des relations : Ces portraits décrivent l'importance des ressources entrantes pour le service urbain et l'autonomie du service face à une rupture d'approvisionnement, les délais de remise en route du système suite à une rupture d'approvisionnement, la fiabilité des fournisseurs, mais également l'importance du service rendu vis-à-vis des clients du service. La structure générale de ces portraits est présentée sur l'exemple de GRDF sur la **Figure 34**. Cependant tous ces portraits ne sont pas accessibles dans la thèse de Toubin. Nous avons donc analysé dans Neo4J seulement les relations présentées dans la **Figure 33**. Cela constitue une base de données avec 23 services urbains et 167 relations de dépendance.

La matrice représentée ici est relativement simple car elle n'a que deux dimensions et un nombre très restreint de lignes. Cependant la représentation matricielle des dépendances rend difficile l'analyse d'une base de données qui serait plus fournie (plus de SUs par exemple) et

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

détaillée (plus de critères que juste la notion d'importance) que celle utilisée ici. Le cas se présente quand plusieurs propriétés caractérisent le même lien de dépendance, obligeant à analyser plusieurs matrices à la fois. C'est pourquoi l'utilisation d'un logiciel de gestion de base de données de type graphe (Neo4J ici, d'autres exemples peuvent être trouvés) facilite le traitement des données disponibles. Neo4J a permis notamment de répondre rapidement aux objectifs suivants, sélectionnés pour leur utilité pour la sécurité civile à comprendre l'écosystème des relations. Les requêtes permettant d'y répondre sont présentées dans cette section comme une ébauche de système automatisé d'analyse des interdépendances entre SUs.

- Obtenir tous les services urbains (SUs) reliés directement puis indirectement au SU étudié en précisant le nombre d'intermédiaires possibles.
- Comparer l'importance des relations entre services urbains.
 - Identifier parmi les fournisseurs indirects les chemins les plus importants dans la hiérarchie des relations de dépendance.
 - En connaissant l'autonomie des services urbains face à une défaillance d'un autre service, identifier les chaînes de défaillances prévisibles au cours du temps. Identifier les chaînes les plus importantes et connaître leur autonomie.
 - Identifier les décalages d'autonomie entre l'autonomie directe déclarée face à la perte d'un fournisseur, et l'autonomie constatée avec Neo4J lorsque l'on prend en compte l'autonomie des fournisseurs indirects.

Ce paragraphe démontre alors en quoi la prise en compte de la défaillance successive de services urbains ne peut pas être assimilée à une modélisation d'effet cascade en elle-même, et en quoi les relations de dépendance sont trop généralistes pour avoir un modèle utile pour la gestion de crise ou la planification. Toubin proposait déjà une analyse de graphe sur ces données, avec le nombre de relations entrantes et sortantes par SUs et une analyse de l'ensemble des interactions [Toubin, 2014]. La démarche innovante de cette section se situe sur l'utilisation d'une base de données orientée graphe pour répondre à des requêtes précises, avec un but opérationnel. Elle a pour but de démontrer la faisabilité d'analyse d'un graphe de relation qui serait constitué à l'échelle de l'infrastructure, et d'illustrer son potentiel intérêt opérationnel.

L'analyse des chaînes de dépendance ne se fera pas au-delà d'un SU intermédiaire (donc trois SUs impliqués). En effet, Toubin montre que, en moyenne, deux SUs sont reliés par moins d'un intermédiaire (allongement moyen du graphe des relations de 1,794). La majorité des SUs sont dépendants de l'ensemble des autres SUs par des chemins de longueur deux (donc avec un intermédiaire).

Une fois importée dans Neo4J, la base de données de relations est représentée telle que sur la **Figure 35**. La visualisation en 2D des relations de dépendance est trop complexe pour être analysée simplement de façon visuelle. Il faut passer par des requêtes pour obtenir des résultats d'analyse.

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

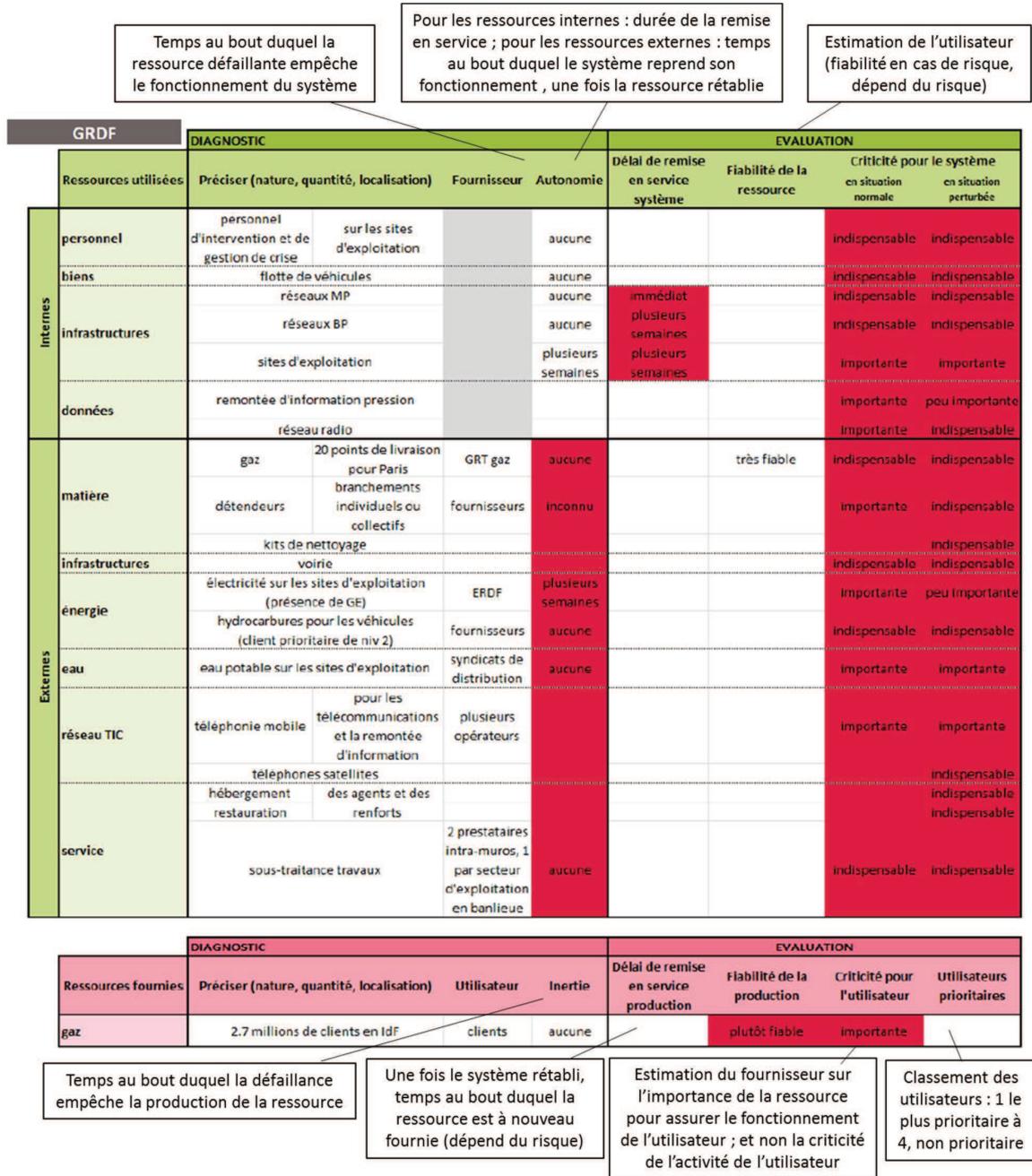


Figure 34 : Portrait sectoriel de GRDF d'après Toubin [Toubin, 2014]



Figure 35 : Relations entre services urbains parisiens représentés avec Neo4J

3.3.2 Potentiel opérationnel de l'utilisation d'une base de données orientée graphe pour la compréhension du territoire

Ce paragraphe a pour but de répondre aux objectifs d'analyse suivants, sélectionnés pour leur utilité pour la sécurité civile à comprendre l'écosystème des relations. Les requêtes permettant d'y répondre sont également présentées dans cette section.

- Obtenir tous les services urbains (SU) reliés directement puis indirectement en précisant le nombre d'intermédiaires possibles. Les points ci-dessous illustrent les caractéristiques du graphe étudié.
 - Trouver les SUs dont dépend directement (par exemple) Véolia.
 - Trouver tous les fournisseurs (par exemple de Véolia) directs et indirects avec un intermédiaire au maximum.
- Comparer l'importance des relations entre services urbains.
 - Identifier parmi les fournisseurs indirects les chemins les plus importants dans la hiérarchie des relations de dépendance.
 - En connaissant l'autonomie des services urbains face à une défaillance d'un autre service, identifier les chaînes d'effets cascade prévisibles au cours du temps. Identifier les chaînes les plus importantes et connaître leur autonomie.
 - Identifier les décalages d'autonomie entre l'autonomie directe déclarée face à la perte d'un fournisseur, et l'autonomie constatée avec Neo4J lorsque l'on prend en compte l'autonomie des fournisseurs indirects.

Les requêtes pour obtenir tous les services urbains (SU) reliés directement puis indirectement en précisant le nombre d'intermédiaires possibles sont présentées ci-dessous brièvement. La

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

représentation des résultats permet de mieux appréhender les caractéristiques du graphe étudié.

1. Les SUs dont dépend directement (par exemple) Véolia sont obtenus avec la requête suivante.

```
MATCH r=(n)-[ ]->(liens)
WHERE n.nom="Véolia"
RETURN liens
```

Le résultat demandé correspond à la liste des SUs directs de Véolia. Neo4J indique en bas à gauche de la fenêtre qu'il a identifié 7 SUs, et qu'il existe entre ces 7 SUs 15 relations de dépendance (**Figure 36**).

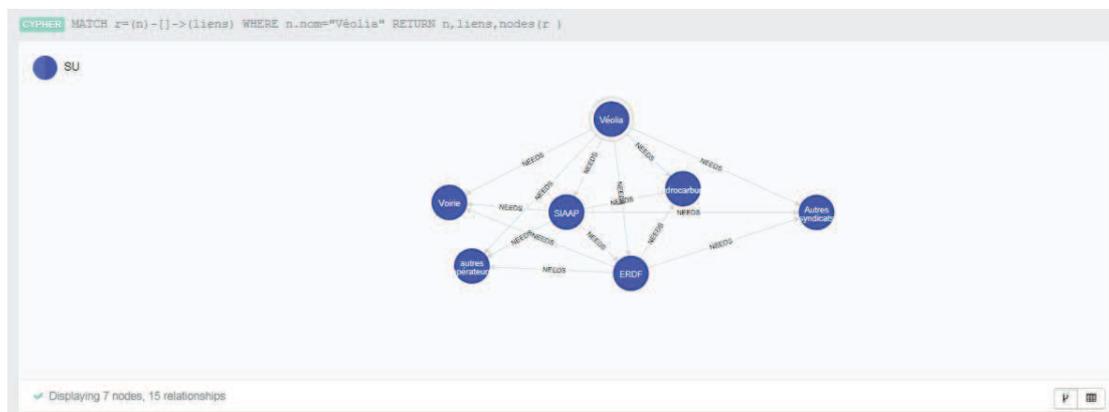


Figure 36 : Services urbains dont dépend directement Véolia

2. Les SUs dont dépend directement et indirectement (par exemple) Véolia sont obtenus avec la requête suivante. Nous considérons un intermédiaire au maximum. En effet l'allongement moyen du graphe est de 1,794, ce qui veut dire qu'un chemin avec plus d'un intermédiaire pourrait relier l'ensemble des SUs de la base de données.

```
MATCH r=(n)-[*..2]->(liens)
WHERE n.nom="Véolia"
RETURN n, liens, nodes(r)
```

La requête identifie 18 SUs (sur les 22 hors Véolia) reliés directement ou indirectement avec un intermédiaire. La commande « nodes(r) » détaille les SUs du chemin entre Véolia et les SUs recherchés. Neo4J indique avoir identifié 29 résultats, soit 29 chemins possibles entre Véolia et ses fournisseurs directs, ou indirects avec un intermédiaire (voir un exemple de chemin sur la **Figure 11**). Cette connaissance a cependant seulement un intérêt si l'on s'intéresse aux propriétés des différents liens de dépendance entre SU et que l'on peut hiérarchiser ces liens.

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile



Figure 37 : Captures d'écrans du résultat représenté par Neo4Jet d'un des chemins identifiés

3. Identifier parmi les fournisseurs indirects les chemins les plus importants.

Le paragraphe suivant permet d'analyser les propriétés des chemins identifiés entre ces services urbains. Toubin a identifié dans sa base de données des relations de dépendance plus ou moins importantes pour chaque service urbain [Toubin, 2014]. Cette importance repose notamment sur la capacité du service urbain à ne pas dégrader ses services suite à une rupture d'approvisionnement. Chaque relation client-fournisseur entre services urbains a été renseignée dans la base de données avec son importance pour le client.

La requête suivante permet de sommer par chemin l'importance des liens qui ont exactement un intermédiaire, puis les trie par ordre décroissant.

```

MATCH r=(n)-[*2..2]->(liens)
WHERE n.nom="Véolia"
RETURN reduce(acc=0, x in relationships(r)|acc+x.criticite) as CRITICITE, nodes(r)
ORDER BY CRITICITE DESC
    
```

Neo4J identifie 23 chemins avec un intermédiaire, avec des importances allant de 8 pour la plus forte à 4 pour la plus faible, comme le montre la

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

Table 19. Les quatre relations les plus importantes passent par ERDF comme fournisseur intermédiaire. Si la place d'ERDF comme fournisseur central n'est pas une révélation, la présence du service d'assainissement (transport et traitement des déchets) SIAAP comme fournisseur direct de chemins avec une forte importance aurait été moins évident à mettre en avant sans l'utilisation d'un graphe relationnel et de cette requête.

Table 19 : Extrait de la table de comparaison de l'importance des fournisseurs indirects de Véolia

Importance	SU étudié	SU fournisseur	
		direct	SU fournisseur au degré N+1
8	Véolia	ERDF	autres opérateurs
8	Véolia	ERDF	Orange mobile
8	Véolia	ERDF	Autres syndicats
8	Véolia	ERDF	Eau de Paris
7	Véolia	SIAAP	autres opérateurs
7	Véolia	SIAAP	autres transports
7	Véolia	SIAAP	RATP métro
7	Véolia	SIAAP	RATP bus
7	Véolia	SIAAP	Voirie
7	Véolia	SIAAP	Autres syndicats
7	Véolia	SIAAP	Eau de Paris
7	Véolia	SIAAP	Hydrocarbures
7	Véolia	SIAAP	ERDF
7	Véolia	ERDF	Voirie
7	Véolia	ERDF	Hydrocarbures
5	Véolia	ERDF	SYCTOM
5	Véolia	ERDF	CPCU

Toubin évalue de façon qualitative l'autonomie des SUs sur la base d'entretiens avec les SUs concernés. Nous avons ajouté celle-ci dans la base de données afin d'avoir une analyse des effets cascade sur deux critères de comparaison. La Table 20 présente les hypothèses prises sur les durées quantitatives d'autonomie pour chaque estimation qualitative de Toubin. Ces durées ont uniquement une vertu illustrative, permettant de sommer les différentes autonomies. Elles ne correspondent en aucun cas à une estimation d'autonomie. Nous cherchons à répondre aux questions suivantes.

4. En connaissant l'autonomie des services urbains face à une défaillance d'un autre service, quelles sont les chaînes de propagations de défaillances prévisibles au cours du temps ? Quelles sont les chaînes les plus importantes, avec quelle autonomie ?

Table 20 : Classes qualitatives d'autonomies d'après Toubin [Toubin, 2014] et hypothèses quantitatives d'autonomie associées

Catégories dans la thèse de Toubin	d'autonomie	Aucune	<12 h	Quelques jours	Plusieurs semaines	Inconnue
Hypothèses du rapport pour illustrer les possibilités de Neo4J	0 h	12 h	24 h	168 h	1000 h	(hypothèse choisie pour discréditer dans l'analyse les liens de dépendance dont les autonomies ne sont pas renseignées)

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

Toutes les dépendances non renseignées sur les capacités d'autonomie ont été volontairement surestimées (1000 h) de façon à ce que l'analyse des chaînes rapides d'effets cascade entre services urbains ne soient pas perturbées par celles-ci. Les requêtes suivantes illustrent les possibilités d'analyse et les intérêts opérationnels potentiels liés à l'utilisation d'une base de données orientée graphe.

- Pour trouver toutes les relations de fournisseur d'ordre 2 avec Véolia par exemple, qui n'ont aucun délai d'autonomie (causes d'interruptions aux conséquences immédiates sur Véolia), il faut exécuter la requête suivante.

```
MATCH r=(a)-[r1]-()-[r2]-(liens)
WHERE a.nom="Véolia" and r1.autonomy<1000 and r2.autonomy<1000
RETURN reduce(acc=0, x in relationships(r)|acc+x.autonomy) as autonomie, nodes(r)
order by autonomie
```

- Pour trouver la chaîne de conséquences et les délais associés (si un SU est défaillant, par exemple Véolia, quels sont les autres services affectés ?), il suffit d'inverser la commande précédente.

```
MATCH r=(a)<-[r1]-()-[r2]-(liens)
WHERE a.nom="Véolia" and r1.autonomy<1000 and r2.autonomy<1000
RETURN liens, reduce(acc=0, x in relationships(r)|acc+x.autonomy) as autonomie, nodes(r)
order by autonomie
```

Les SUs ne doivent pas être tous considérés de la même façon dans l'analyse des chaînes de défaillances. Le rôle central du SU ERDF est relativement évident. Ce paragraphe illustre sur l'exemple d'ERDF en quoi une modélisation de conséquences à l'échelle du SUs ne peut pas être considérée comme une modélisation d'effet cascade, et justifie le besoin de descendre à une échelle d'analyse plus fine : celle de l'infrastructure.

- Lorsque l'on parle d'électricité, il faut parler de délai d'autonomie, mais également de l'importance des liens à l'électricité. La commande ci-dessous permet de trier en fonction de l'importance décroissante et de l'autonomie croissante les services urbains dépendants au degré 2 de l'électricité.

```
MATCH r=(a)<-[r1]-()-[r2]-(liens)
WHERE a.nom="ERDF" and r1.autonomy<1000 and r2.autonomy<1000
RETURN liens, reduce(acc=0, x in relationships(r)|acc+x.criticality) as importance, reduce(acc=0, x in relationships(r)|acc+x.autonomy) as autonomie, nodes(r)
order by importance DESC, autonomie
```

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

Comme il existe plusieurs intermédiaires entre deux SU, les SUs peuvent apparaître plusieurs fois dans les résultats. Comme les données d'autonomie ne sont pas précises, aucune analyse approfondie ne peut être faite. En revanche, cette requête illustre les possibilités d'analyse de Neo4J en temps extrêmement court (en 765 ms) pour cet exemple. Elle montre également qu'à un niveau général d'analyse, il existe des boucles de rétroaction relativement courtes. La requête identifie par exemple qu'une panne électrique peut impacter la RATP qui impactera à son tour le fonctionnement général des services de propreté. Mais les services de propreté eux-mêmes sont touchés directement par cette panne, et peuvent impacter en deuxième temps les services de la RATP selon les données de [Toubin, 2014]. Ces courtes boucles de rétroactions étaient prévisibles dès lors que le graphe a un allongement moyen à 1,794. Cependant il est intéressant de hiérarchiser ces boucles de rétroaction en fonction de l'autonomie calculée et de l'importance des liens de dépendance.

La démarche précédente permet à la sécurité civile d'identifier les boucles d'impact suite à une coupure d'ERDF les plus problématiques par leur manque d'autonomie et l'importance du service fourni. C'est une démarche de compréhension générale, mais qui apporte peu pour la planification ou la gestion de crise. En effet elle ne reflète pas les différences d'autonomies des infrastructures derrière les SUs. Constituer à une échelle plus fine une base de données de dépendances permettrait d'obtenir avec les requêtes précédentes des résultats de boucles bien plus utiles pour la sécurité civile. La base de données à l'échelle macro permet néanmoins de comparer la cohérence des autonomies directes déclarées par les SUs face à une coupure d'électricité, avec l'autonomie indirecte constatée en prenant en compte les effets indirects avec la requête suivante. La Table 21 compare les résultats obtenus par celle-ci, en considérant les dépendances d'ordre 2 (un intermédiaire), avec l'autonomie calculée sans intermédiaire face au service défaillant (ERDF ici).

```
MATCH r=(a)-[r1]-(b)-[r2]-(liens), p=(a)-[r3]-(liens)
WHERE a.nom="ERDF" and r1.autonomy<1000 and r2.autonomy<1000 and
1000>r3.autonomy and r3.autonomy>r1.autonomy and r3.autonomy>r2.autonomy
RETURN r3.autonomy as autonomieDir,(r1.autonomy + r2.autonomy + ABS(r1.autonomy -
r2.autonomy))/2 as autonomieIndi,liens as SU,b as intermediaire
```

Table 21 : Différences d'autonomie entre les dépendances directes et la prise en compte de dépendances d'ordre 2

SU dépendants d'ERDF	Autonomie directe déclarée	Autonomie constatée en étudiant les dépendances d'ordre 2
Orange internet	Journée	Aucune
Orange mobile	Journée	Aucune
PC Lutèce	Journée	Aucune
GRDF	Supérieure à une semaine	Journée

La prise en compte de chemins indirects modifie les délais d'autonomie initialement estimés pour certains SUs (Orange, PC Lutèce, Eau de Paris, GRDF). Il serait intéressant pour la

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

sécurité civile d'analyser en priorité ces liens de dépendances avec les opérateurs pour discuter des estimations d'autonomie vis-à-vis du risque d'effet cascade. On est donc bien sur un outil de compréhension des interdépendances entre SUs et non pas sur un outil d'aide à la décision en tant que tel.

3.3.3 Limites de l'approche base de données orientée graphe à l'échelle du service urbain et nécessité de spatialiser les dépendances

La création d'une base de données pertinente et adaptée au besoin de modélisation est un préalable à toute analyse. Ce travail utilise des données à l'échelle du service urbain, à la fois pour illustrer le potentiel d'utilisation d'une base de données orientée graphe pour la sécurité civile, et pour démontrer la nécessité de construire une base de données à une échelle plus fine pour modéliser des effets cascade.

Neo4J, par sa structure, permet d'interroger facilement une base de données contenant les dépendances entre objets étudiés. Il fournit une première analyse rapide des relations d'un système complexe. Lorsque le système étudié contient des centaines de relations, la représentation sous forme matricielle des liens et de leurs caractéristiques n'est plus possible. Il faut passer par un logiciel de gestion de base de données. Neo4J en est un exemple, car il a été conçu pour analyser des relations et non pas analyser des entités comme les gestionnaires classiques de base de données. Une base de données orientée graphe ne correspond pas en soi à une capacité de modélisation. Il permet en revanche de poser les bases d'une compréhension automatisée des dépendances entre services urbains. L'utilisation de ces requêtes permet par exemple d'identifier les décalages d'autonomie entre l'autonomie directe déclarée face à la perte d'un fournisseur, et l'autonomie constatée avec Neo4J lorsque l'on prend en compte l'autonomie des fournisseurs indirects. Comme l'analyse des délais de défaillance s'appuie sur les données estimées par les opérateurs, il est important de construire une base de données cohérente (une même définition de l'autonomie pour tous, une même grille d'estimation de l'importance des dépendances pour tous) pour avoir une modélisation pertinente.

Cependant l'analyse au niveau du service urbain ne permet pas d'arriver à un niveau de détail suffisant pour identifier les effets cascade, car elle ne reflète pas les différences locales du réseau d'infrastructure : Tous les services urbains ne s'arrêtent pas instantanément lorsqu'il n'y a pas d'autonomie vis-à-vis d'un fournisseur, seuls quelques services sont immédiatement perturbés, et parmi ces services, seules quelques infrastructures localisées ne peuvent plus assurer leur service (défaillance). De plus l'arrêt d'un service est souvent associé à une zone d'impact, et pas à l'arrêt de ce service sur l'ensemble du territoire. Il manque donc une analyse plus fine de ces liens de dépendance, qui prend en compte des liens spatialisés et caractérisés à l'échelle de l'infrastructure.

La section suivante discute de la transcription d'une base de données orientée graphe à l'échelle de l'infrastructure en termes d'impact sur la société. Si cette base existait, pourrait-on traduire les chaînes de défaillance à l'échelle de l'infrastructure en zones d'impact sur la société ? C'est-à-dire pourrait-on obtenir des indicateurs utiles pour la sécurité civile pour la gestion de crise ou la planification ? Attribuer par anticipation une zone d'impact à une

infrastructure signifie qu'il est possible de définir celle-ci, indépendamment du scénario étudié. Les infrastructures éligibles à cette approche sont décrites ci-dessous.

3.4 Discussion sur la possibilité d'attribuer des zones d'impact fixes aux infrastructures de chaque réseau technique

Le travail précédent a souligné l'importance d'analyser à une échelle plus fine que celle du SU l'interruption de service. La présente section teste la faisabilité de l'attribution de zones d'impact fixes à chaque infrastructure. Une infrastructure possède une zone d'impact fixe s'il est possible de définir, par avance, l'étendue de la zone privée de service suite à la défaillance de l'infrastructure. Cela correspond aux deux cas suivants.

- Le réseau ne peut pas se réorganiser techniquement face à cette défaillance (c'est le cas par exemple d'une structure arborée).
- Il n'existe qu'une possibilité de reconfiguration du réseau pour cette défaillance, reconfiguration qui est prévisible et automatique.

Dès lors que la connaissance de la zone d'impact est influencée par les données de contexte (consommation, etc.) ou que la zone privée de ressource est amenée à évoluer dans le temps en fonction de la durée de défaillance de l'infrastructure, alors on parlera de zones d'impact évolutives.

Ainsi, tester l'attribution des zones d'impacts fixes aux infrastructures signifie tester la possibilité de définir en anticipation l'espace sur lequel le service ne sera plus fourni suite à la défaillance de l'infrastructure. Cela permettrait d'établir une base de données orientée graphe à l'échelle de l'infrastructure, infrastructures elles-mêmes caractérisées par la zone d'impact fixe associée (constitution des couples (infrastructure, zone d'impact fixe)). Les paragraphes suivants cherchent à savoir, réseau par réseau, quelles sont les infrastructures éligibles à cette approche, comment calculer ces zones, si une approche fixe est possible ou si une approche évolutive est nécessaire, et enfin quelles sont les conditions de validité de celle-ci.

Nous nous limitons ici à la défaillance d'une infrastructure en termes de quantité de service produit, et non pas en termes de détérioration de la qualité du service produit par l'infrastructure.

3.4.1 Réseau électrique de distribution

Nous avons vu dans le chapitre 2 que le réseau électrique de distribution a un seul fournisseur, RTE, qui alimente à travers des postes source un réseau moyenne tension, qui alimente lui-même via des transformateurs le réseau basse tension. Nous avons vu également qu'il existe différents types de structures, et celles-ci vont avoir un rôle important dans la définition de zones d'impact.

Présentation d'une approche existante utilisant des zones d'impact fixes

Dutozia [Dutozia, 2013] a attribué des « bassins de dépendance spatiale » aux postes source sur Marseille (**Figure 38**), en associant chaque transformateur au poste source le plus proche,

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

selon l'hypothèse simplificatrice que « l'électricité emprunte le plus court chemin ». Cela se traduit par la création de polygones de Voronoï autour de postes source (**Figure 39**). Ces polygones correspondent pour chaque point (poste source) à l'association de l'espace qui lui est le plus proche. Il en résulte une tessellation du territoire autour de ces points. Dutozia a conscience de l'incertitude associée à cette approche, en particulier aux frontières communes entre plusieurs polygones : « Les limites des objets spatiaux vont donc s'estomper et devenir des espaces imprécis tandis que persisteront des noyaux de certitude. » Afin de valider cette méthode, Dutozia a comparé les résultats des polygones de Voronoï avec les données d'ERDF sur la dépendance des différents segments du réseau aux postes source sur la ville de Marseille. La figure ci-dessous illustre un résultat satisfaisant et cohérent pour une approximation de zones d'influence. Il montre également, « qu'au milieu d'un ensemble de lignes dépendantes d'un poste, peut exister une ligne dépendante d'un autre poste » et qu'au niveau du poste de transformation du centre-ville (Sylvabelle) « la partition de Voronoï semble surestimer la surface de cette zone de dépendance. Cette surestimation de la zone du poste de transformation Sylvabelle est liée au fait que ce dernier est le poste de plus faible niveau de tension (63 kV contre 225 kV pour les sept autres) et qu'il alimente une zone très dense du tissu urbain marseillais » [Dutozia, 2013]. Dutozia souligne par-là que le modèle pourrait gagner en précision s'il utilisait une pondération des polygones liée au niveau de tension des postes source (63, 90 et 225 kV) : plus la tension est élevée, et plus l'influence (donc la distance) couverte par un poste source sera grande. Puis Dutozia attribue à chaque poste source les postes de distribution situés dans le polygone de Voronoï du poste source (**Figure 40**).

Il existe sur Marseille 4279 postes de distribution, dont 3359 postes publics, 712 postes clients (livrant les industriels en moyenne tension), et 208 postes mixtes (assurant à la fois le rôle de poste publique et de poste client). Afin d'avoir le deuxième niveau de zones d'impact, Dutozia a créé une couche de polygones de Voronoï autour des postes publics, puis une seconde couche de polygones autour des postes clients. On a alors deux niveaux de zones d'impact : un à l'échelle du poste source, et un à l'échelle du poste de distribution, comme le montre la carte finale. Cette deuxième couche, plus fine, permet notamment de croiser le polygone d'impact du poste de distribution avec la localisation des enjeux (hôpitaux, écoles, etc) et donc de créer artificiellement le lien de dépendance entre un poste de distribution et les enjeux électro-dépendants sur le territoire.

Cette approche propose donc d'attribuer une zone fixe d'impact à la fois aux postes sources et aux postes de distribution, basée uniquement sur leur localisation. Elle a l'avantage d'utiliser très peu de données et de proposer des zones d'impact échelonnées par niveau d'infrastructure. Elle aurait pu être également étendue à la défaillance d'une ligne électrique, en agrégeant les zones d'impact des postes de distribution situés sur celle-ci.

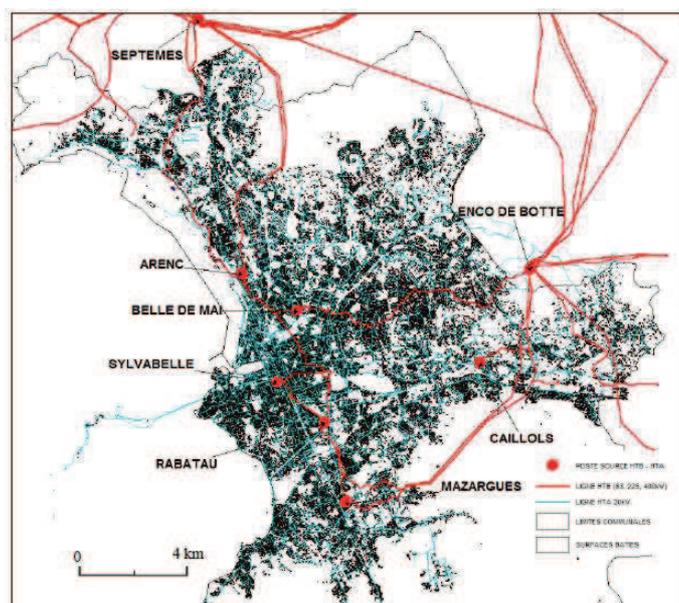


Figure 38 : Alimentation de la commune de Marseille selon [Dutozia, 2013]

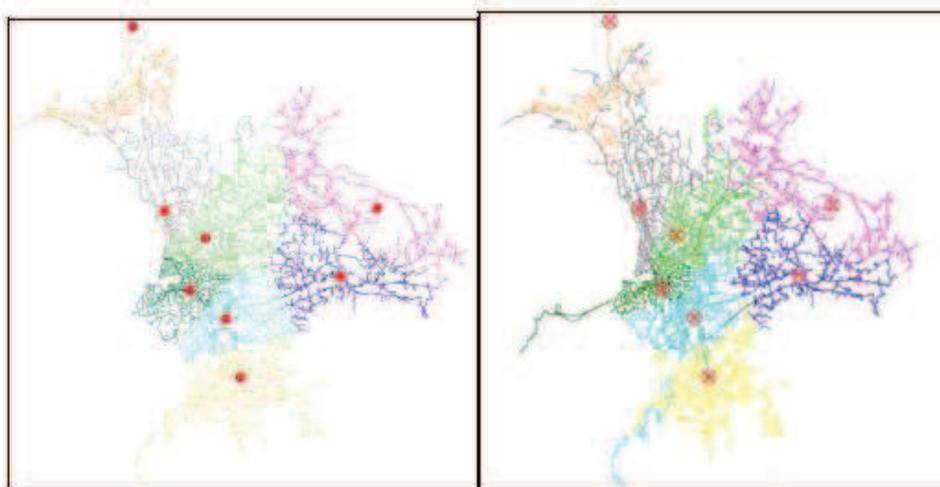


Figure 39 : A gauche : les polygones de Voronoï contraints par les limites de la commune de Marseille, à droite : organisation des secteurs d'après la base de données d'ERDF selon [Dutozia, 2013]

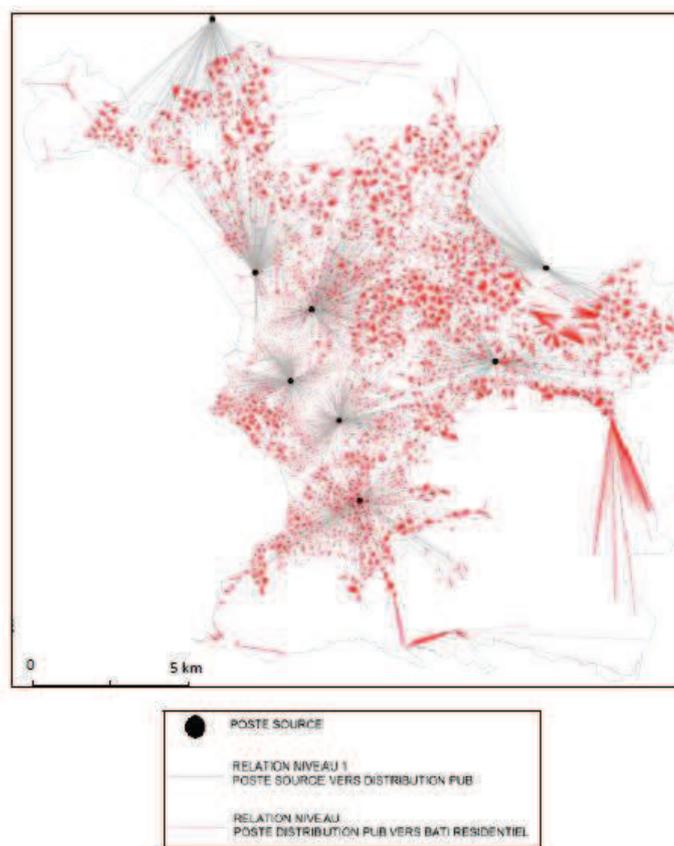


Figure 40 : Raccordement des postes publics de distribution aux bâtiments résidentiels de Marseille en rouge, et aux postes source en gris [Dutozia, 2013]

Discussion sur l'approche fixe existante, et sur la nécessité de développer une approche évolutive

La méthode de Dutozia a été comparée seulement pour les postes source, en fonctionnement normal avec les données ERDF. Or, on a vu précédemment qu'il existait pour certaines lignes moyenne tension des possibilités de reconfiguration, notamment via des « interrupteurs télécommandables » ou via la topologie du réseau, qui seraient utilisées en période de crise. On aurait alors des zones d'impact tout à fait différentes en très peu de temps, voire inexistantes si la capacité d'absorption du réseau le permet. Il faut donc transformer l'approche fixe des polygones de Voronoï autour des postes source en une approche plus évolutive, adaptée à une situation de multiples défaillances d'infrastructure, pour moduler les zones d'impact des postes source en fonction de la capacité locale d'absorption et de réaction du réseau. Calculer une succession temporelle de zones d'impact fixe nécessite de prendre en compte, dans un modèle, les autres infrastructures reliées à l'infrastructure défaillante. Cela signifie qu'une approche uniquement centrée sur une seule infrastructure ne permet pas de calculer une succession de zones d'impact. Le modèle n'en est pas pour autant forcément un modèle électrique calculant les flux, ce peut être un modèle de comportement comme le montre l'outil CIPRNet (voir le chapitre 2). Il est cependant à noter qu'à la fois CIPRNet et Dutozia utilisent une approche de zone d'impact fixe autour des postes de distribution. Cela est justifié car la capacité d'adaptation du réseau de distribution se situe généralement au

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

niveau de la moyenne tension et non pas au niveau de la basse tension. En revanche, l'utilisation de polygones de Voronoï comme territoire de distribution de la basse tension n'a pas été validée à la connaissance des auteurs ; d'autant plus que lors des observations réalisées sur l'exercice Sequana (crue centennale en Ile-de-France), les représentants d'ERDF étaient très sceptiques sur la pertinence de polygones de Voronoï autour des postes de PD comme approximation de leur réseau basse tension [Grangeat, ERDF, Observation Sequana, 2016].

Connaître par avance les zones d'impact permet de simuler un effet cascade depuis la défaillance d'une infrastructure du réseau électrique vers la défaillance d'autres infrastructures d'autres réseaux techniques. Il est important de voir l'utilisation de polygones de Voronoï seulement comme un moyen pour approcher les zones d'impact avec peu de données. Ils sont cependant plus représentatifs d'un fonctionnement normal que d'un fonctionnement dégradé. Ces polygones ont une utilité complémentaire des outils de télégestion existants pour la gestion de crise. En effet, l'utilisation des médias sociaux et le développement du nouveau compteur électrique communiquant Linky [ERDF, 2016] sont autant de capteurs extrêmement rapides pour connaître l'ampleur de la panne. Ils ne sont pas pour autant encore développés partout. Avant ces outils, il fallait estimer cette ampleur grâce aux quelques postes de distribution équipés d'OMT (organe manœuvré par télécommande). Mais ils ne représentaient en 2013 qu'un dixième des postes sur Marseille [Dutozia, 2013], ce qui compliquait la détection de pannes multi-défauts très souvent présentes lors de perturbations externes étendues (inondation par exemple).

Possibilité technique d'utiliser des zones d'impact fixes selon la topologie du réseau moyenne tension

Nous avons vu que la zone de distribution attribuée à un poste source en fonctionnement normal ne correspond pas forcément à la zone d'impact en cas de défaillance de celui-ci. Le paragraphe ci-dessous discute de la possibilité d'attribuer à la défaillance d'un poste source ou à la défaillance d'un élément de la ligne moyenne tension une succession de zones d'impact fixes. Cette possibilité est détaillée selon les topologies physiques du réseau électrique moyenne tension. Quatre cas peuvent être distingués.

- Le réseau est à simple dérivation depuis le poste source, et les lignes de moyenne tension ne possèdent pas d'interrupteurs télécommandables leur permettant de se brancher sur un autre poste source dans le cas d'une défaillance (situation en zone rurale). Le réseau possède alors seulement comme protection le disjoncteur à la sortie du poste source, et ceux aux branchements des artères secondaires. On peut alors parler d'une zone d'impact fixe pour chaque artère secondaire, et d'une zone d'impact associée à la défaillance du poste source qui est la somme de ces zones d'artères secondaires. Une défaillance de l'artère principale pourrait être traitée de façon équivalente à la défaillance d'un poste source, sauf si l'artère possède des sectionneurs à tores entre la défaillance et le poste source. Dans cette situation, l'artère principale est réalimentée rapidement entre le poste source et le sectionneur donc la zone d'impact à moyen terme devient l'ensemble des zones d'impact des artères secondaires non réalimentées (qui peut être différente de la somme des zones d'impact

de toutes les artères secondaires). Comme on le voit dans cet exemple qui n'a pas de possibilité de reconfiguration topologique (pas d'interrupteur au bout, **Figure 41**), il faut déjà distinguer différents scénarios de défaillances pour calculer des zones d'impact. La Table 22 ci-dessous les récapitule.

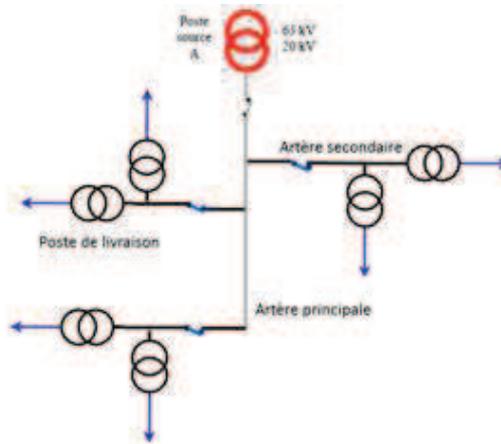


Figure 41 : Réseau électrique à simple dérivation sans possibilité de reconfiguration

Table 22 : Zones d'impact fixe par infrastructure sur un réseau électrique à simple dérivation sans possibilité de reconfiguration

Scénario	Zone d'impact fixe associée à moyen terme
Défaillance de poste de distribution	Zone fixe de distribution
Défaillance d'une artère secondaire	Ensemble des zones fixes associées aux postes de distribution situées sur cette artère secondaire (le disjoncteur de début d'artère secondaire protège la ligne principale)
Défaillance sur l'artère principale en l'absence de sectionneurs	Equivalent au scénario « Défaillance de poste source »
Défaillance sur l'artère principale en l'absence de sectionneur entre la défaillance et le poste source.	Ensemble des zones fixes associées aux artères secondaires non branchées entre le poste source et l'interrupteur désamorcé.
Défaillance sur l'artère principale en l'absence d'un sectionneur entre la défaillance et le poste source.	Equivalent au scénario « Défaillance de poste source »
Défaillance de poste source	Ensemble des zones fixes associées aux postes de distribution

En l'absence de possibilité de reconfiguration topologique, il est réaliste de définir une zone d'impact fixe à moyen terme, par scénario. Ces zones d'impact sont conditionnées par le nombre et la localisation des ouvrages de protection du réseau.

- Le réseau est à simple dérivation depuis le poste source, et les lignes de moyenne tension possèdent pour certaines un interrupteur télécommandable à leur extrémité,

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

leur permettant de se brancher sur un autre poste source dans le cas d'une défaillance. Le réseau a donc une possibilité de reconfiguration topologique. Cela va modifier les zones d'impact qui concernent les artères secondaires avec interrupteur, l'artère principale - si elle a un interrupteur- et le scénario de défaillance du poste source. En effet, dès que l'on a une capacité de reconfiguration il faut voir à la fois la zone d'impact immédiate, puis la seconde zone d'impact après reconfiguration topologique. Pour le réseau électrique, il n'y a que ces deux phases à prendre en compte : l'impact immédiat est suivi d'une recherche très rapide d'un équilibre électrique, sorte de palier de stabilisation intermédiaire en attendant la réparation de la défaillance en elle-même. Les impacts immédiats sont ceux décrits dans le cas 1 de la Table 23, et sont dus uniquement au mécanisme de protection (capacité d'absorption) du réseau électrique. Les impacts secondaires doivent refléter cette capacité d'adaptation et sont décrits ci-dessous.

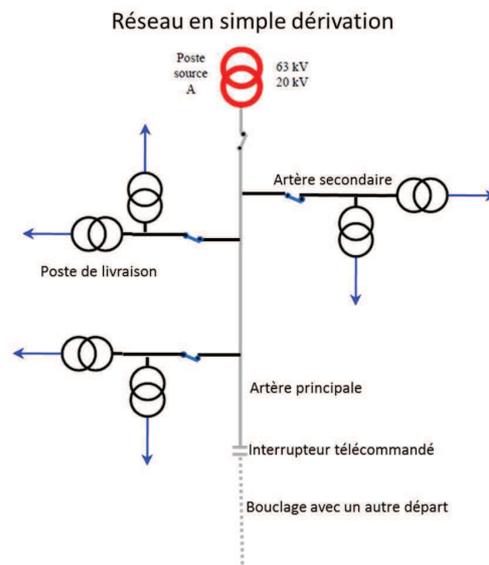


Figure 42 : Illustration d'une structure de réseau MT en simple dérivation

Table 23 : Zones d'impact fixes par infrastructure sur un réseau électrique à simple dérivation avec possibilité de reconfiguration

Scénario modifié par la présence d'interrupteurs	Zone d'impact primaire (1) et secondaire (2). t désigne le temps de mise en œuvre de l'interrupteur.
Défaillance d'une artère secondaire avec un interrupteur en bout de ligne.	1. Ensemble des zones fixes associées aux postes de distribution situées sur cette artère secondaire 2. Aucune zone d'impact secondaire. La présence d'interrupteur signifie que le réseau a été dimensionné pour assurer cette situation d'approvisionnement électrique de secours.
Défaillance sur l'artère principale en l'absence de sectionneurs avec un interrupteur en bout de ligne. Certaines artères secondaires ont un interrupteur en bout de ligne.	1. Ensemble des zones fixes associées aux postes de distribution 2. S'il n'y a pas de sectionneurs pour isoler le défaut, la reconfiguration topologique n'est pas possible. Les zones d'impact secondaire sont alors équivalentes aux zones primaires. Si les artères secondaires peuvent être isolées de l'artère principale, alors celles possédant un interrupteur peuvent être réalimentées par une autre ligne moyenne tension, et celles-ci diminuent d'autant les zones d'impact secondaire.
Défaillance sur l'artère principale en présence d'un sectionneur entre la défaillance et le poste source, et en présence d'un interrupteur en bout de ligne.	1. Ensemble des zones fixes non associées aux artères secondaires branchées entre le poste source et l'interrupteur désamorcé. 2. Deux situations : Soit il existe en aval de la défaillance un sectionneur qui permet d'isoler la défaillance, et auquel cas le réseau peut être réalimenté via l'interrupteur de bout de ligne. La zone d'impact secondaire devient alors l'ensemble des zones associées aux artères secondaires branchées sur la partie isolée de l'artère principale. Celle-ci peut encore être réduite s'il existe parmi ces artères secondaires à la fois la possibilité de les couper de l'artère principale et en même temps un interrupteur de réalimentation en bout de ligne. Soit il n'existe pas en aval de sectionneur qui permettrait d'isoler la défaillance, et le réseau ne peut pas être réalimenté via l'interrupteur de bout de ligne. La zone d'impact secondaire devient alors l'ensemble des zones associées aux artères secondaires branchées sur la partie isolée de l'artère principale, moins les artères secondaires qui ont à la fois la possibilité de se couper de l'artère principale et en même temps un interrupteur de réalimentation en bout de ligne.
Défaillance sur l'artère principale sans présence d'un sectionneur entre la défaillance et le poste source.	Equivalent au scénario « Défaillance de poste source »
Défaillance de poste source en présence d'un interrupteur en bout de ligne	1. Ensemble des zones fixes associées aux postes de distribution. 2. La présence d'un interrupteur en bout de ligne signifie que le réseau a été dimensionné pour pouvoir être alimenté par la seconde source. A t, il n'y a plus de zones d'impact.

Sur le tableau 12, on voit qu'il y a une évolution de la gravité des scénarios : la gravité immédiate n'augure pas forcément une gravité secondaire. Le scénario de défaillance du poste source ne devient pas alors le plus grave – contrairement à un réseau sans capacité d'adaptation – mais c'est le scénario avec une défaillance localisée, de telle

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

sorte que l'on ne puisse pas mettre en œuvre les mécanismes d'adaptation, qui est le plus grave en termes d'étendue de zones d'impact.

- Le réseau est à coupure d'artère. Chaque poste de distribution devient un sectionneur potentiel, et la défaillance d'un élément de réseau est systématiquement isolable. De même, la défaillance d'un poste source peut être compensée par le branchement sur un autre poste source. Ce réseau est très sûr et il faut parler de scénarios de double défaillance si l'on souhaite établir des zones d'impact. Cette structure n'est donc plus du tout éligible à l'approche relativement simple « un poste source = une zone d'impact fixe ». Il ne faut plus considérer les scénarios simples de défaillance d'une infrastructure, mais des scénarios de doubles défaillances, ce qui implique de connaître la capacité de reconfiguration du système. Cela signifie également que l'approche base de données orientée graphe où chaque infrastructure est caractérisée par une zone d'impact fixe n'est pas adaptée aux infrastructures électriques appartenant à un réseau en coupure d'artère, car une base de données orientée graphe ne peut pas simuler les reconfigurations des relations de dépendance entre infrastructures aussi finement que des simulateurs spécifiques aux réseaux. Néanmoins, il est intéressant de voir s'il est possible de connaître par avance les couples (« scénario de multiple défaillance », « zone d'impact fixe associée ») pour les infrastructures électriques appartenant à un réseau en coupure d'artère. Ces scénarios de double défaillance doivent obligatoirement provoquer l'isolement d'une partie du réseau avec des postes de distribution pour causer une zone d'impact. C'est possible dans plusieurs configurations :

- soit par une double défaillance à deux endroits de la ligne moyenne tension,
- soit par la mise hors service simultanée des deux postes source qui assurent ce service,
- soit par la défaillance d'un poste de distribution (scénario simple défaillance).

Si l'on considère qu'il y a N lignes vulnérables, reliant $(N-1)$ postes de distribution pour les deux postes source, la formule ci-dessous calcule le nombre de scénarios à considérer pour une simple ou une double défaillance.

Nombre de scénarios (simple et double défaillances) (2)

$$= 1 + (N - 1) + C_2^N = N + \frac{N(N - 1)}{2} = \frac{N(N + 1)}{2}$$

Avec N = nombre de tronçons de lignes entre postes de distribution

Pour 3 postes de distribution, donc 4 lignes vulnérables, on compte donc 10 scénarios de double défaillance de lignes, de défaillance de poste de distribution ou de double défaillance de poste source. A chaque scénario est associée la zone d'impact des postes de distribution isolés. Il est donc envisageable pour cette topologie de créer une base de données contenant les couples (« scénario de double défaillance », « zones d'impact »).

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

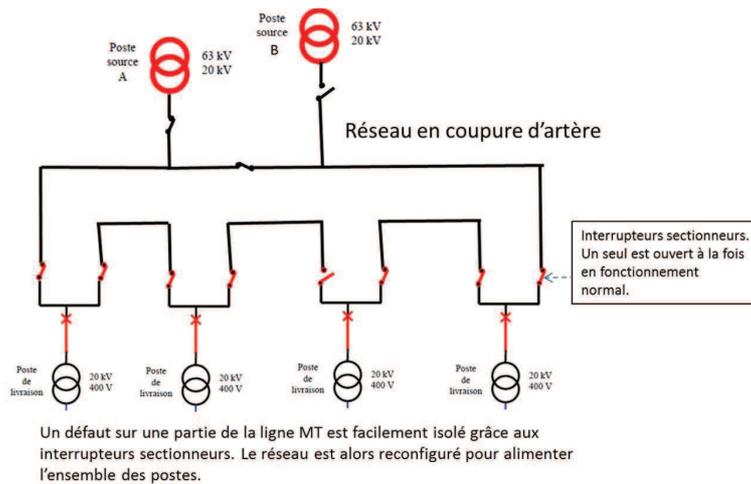


Figure 43 : Illustration d'une structure de réseau MT en coupure d'artère

- Les réseaux à double dérivation sont encore plus sûrs que les réseaux à double artère. Il y a bien moins de combinaison de doubles défaillances sur les parties du réseau qui aboutissent à une zone d'impact. Cela dépend du nombre de connexions entre les différentes sources. Il faudrait avoir une quadruple défaillance (deux sur une des lignes, deux sur l'autre) pour réellement isoler un poste de distribution. Même le scénario de la double défaillance simultanée des deux postes source ne crée pas systématiquement de zones d'impact. En effet la configuration de double dérivation est utilisée pour les réseaux enterrés des grandes villes, et au vu de l'enjeu, ils sont parfois localement assurés contre une triple défaillance de postes source (sur certaines zones franciliennes notamment). La création d'une base de données avec toutes les nombreuses combinaisons de (« scénario de quadruple défaillance », « zones d'impact ») est possible, mais aurait peu de sens en tant que telle. Elle doit servir à analyser des événements où la perturbation extérieure du réseau serait étendue et permettrait l'agression simultanée de plusieurs parties du réseau (exemple de la crue centennale en Île-de-France). On se retourne alors vers une analyse par scénarios caractérisés, plus rapides à obtenir mais non transposable à d'autres situations. Les zones d'impact recherchées nécessitent à ce moment-là l'utilisation de simulateurs spécifiques.

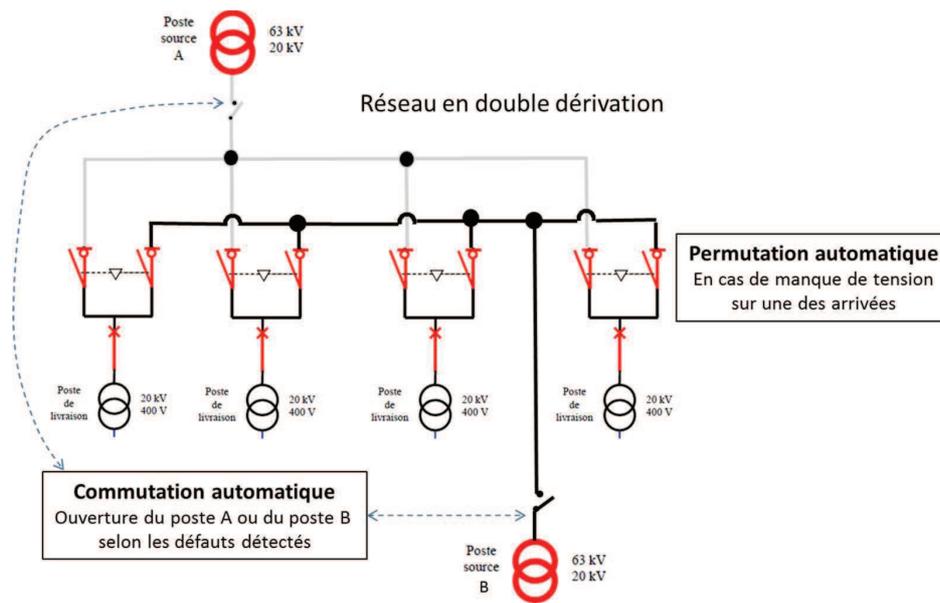


Figure 44 : Illustration d'une structure de réseau MT en double dérivation

En conclusion, le réseau électrique peut être approché par une approche (infrastructure, zone d'impact fixe) principalement en milieu rural et seulement s'il n'a pas de capacités de reconfiguration. Si le réseau est à simple dérivation avec des possibilités de reconfiguration, il faut déjà différencier deux types de zones d'impact fixes associées à l'infrastructure : l'immédiate, et celle secondaire qui correspond au résultat de la reconfiguration. C'est cette dernière qui intéresse la sécurité civile pour l'estimation des conséquences sur la société.

Si le réseau est à coupure d'artère, il faut considérer des scénarios de double défaillance pour avoir une zone d'impact. On ne peut alors plus s'intéresser au couple (infrastructure, zone d'impact fixe), mais il faut s'intéresser au couple (« scénario de multiple défaillance », « zone d'impact fixe associée »), couple qui prend en compte la capacité de reconfiguration du système. Comme l'on ne peut plus caractériser une infrastructure par une zone d'impact fixe associée, la construction d'une base de données orientée graphe à l'échelle de l'infrastructure pour modéliser les effets cascade perd de son intérêt.

Cependant, la constitution d'une base de données (« scénario de multiple défaillance », « zone d'impact fixe associée ») appliquée aux postes de distribution reste dans tous les cas un élément de compréhension du territoire qui peut être intéressant à avoir en gestion de crise ou planification pour les autorités de sécurité civile pour des menaces plus localisées (estimation des conséquences d'un scénario). Le nombre de scénario est relativement important, mais l'approximation d'une seule zone d'impact à moyen terme est possible car il s'agit simplement des postes de distribution isolés par la double faute. Enfin, la configuration en double dérivation nécessite une triple ou une quadruple défaillance simultanée, ce qui n'a de sens que lorsque l'on parle d'évènements extérieurs étendus, comme une crue par exemple. Il serait plus utile alors de définir les scénarios sur lesquels ces zones d'impact doivent être calculées, et ne garder que ces zones.

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

Ce paragraphe montre également qu'il est possible d'approximer le comportement du réseau électrique sans utiliser de modèles de flux, qui nécessitent énormément de données. La diminution du nombre de données à mettre à jour est un avantage opérationnel pour maintenir un modèle fonctionnel. Ce paragraphe s'est appuyé également sur les capacités d'absorption et d'adaptation du réseau, qui sont deux des trois piliers de la résilience (voir leur définition dans le chapitre 2). Le troisième pilier, la capacité de restauration en un temps et un coût acceptable, ne sera pas étudié ici car il est fortement lié à la description du scénario (de quelle façon l'infrastructure a-t-elle été endommagée, quel est l'équipement qui a le plus souffert, cet équipement est-il facilement remplaçable, etc.) et non pas seulement à la présence d'une défaillance.

3.4.2 Réseau d'eau potable

Nous allons voir dans ce paragraphe si le réseau d'eau potable peut correspondre au couple (infrastructure, zone d'impact fixe), ou s'il doit lui aussi être approché par le couple (« scénario de multiple défaillance », « zone d'impact fixe associée »).

Le réseau d'eau présente trois niveaux de canalisations : celles de transfert entre les usines de production et les réservoirs, celles moyennes partant de ces réservoirs, et enfin les petites canalisations de distribution. Certaines infrastructures du réseau d'eau potable sont alimentées de façon gravitaire, d'autres nécessitent la présence de surpresseurs afin d'alimenter les points les plus élevés du réseau.

Contrairement au réseau électrique, le réseau d'eau potable est extrêmement maillé au niveau des canalisations de distribution, mais moins au niveau des grands diamètres ; ce qui veut dire qu'on ne peut pas parler de zones d'impact associée à la rupture de canalisations de petit ou moyen diamètre (absorbée immédiatement par la structure du réseau). La définition de zone d'impact associée à la rupture de canalisation de grand diamètre (lien entre réservoirs et usines) n'en n'est pas pour autant facile. En effet, leur rupture supprime une possibilité d'approvisionnement d'un réservoir, mais ne signifie pas forcément que celui-ci n'est plus alimenté (redondance d'approvisionnement pour certains). Il faut donc distinguer les canalisations selon les réservoirs qu'elles alimentent. Puis il faut distinguer les réservoirs selon leur nombre de possibilités d'approvisionnement, et considérer autant de défaillances simultanées pour parler de zone d'impact de ruptures de canalisations. Le schéma ci-dessous propose un modèle simplifié d'un réseau d'eau réaliste mais fictif. Il possède trois usines de production associées à des aires de distribution, deux usines de transfert, cinq stockages dont deux sont situées dans des zones plus élevées que les aires de distribution A1, A2 et A3.

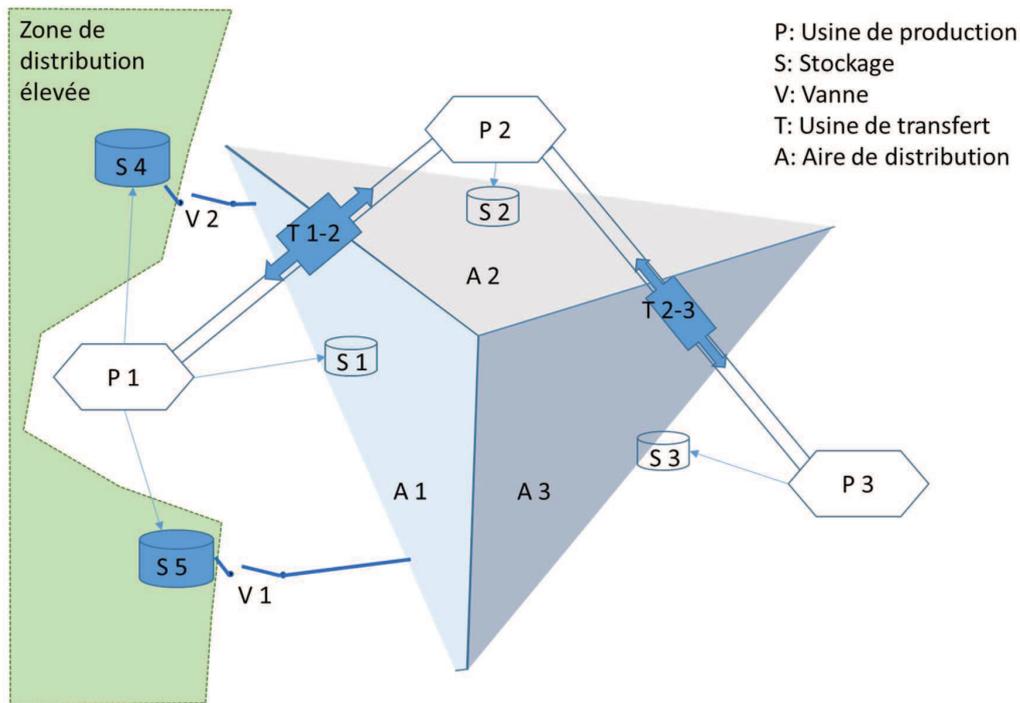


Figure 45 : Schéma d'un réseau d'eau réaliste mais fictif

Les usines de production d'eau potable sont reliées entre elles par des canalisations de grand diamètre. Sur chacune d'elles se trouvent une usine de transfert, qui permet de « pousser l'eau » sur ces grandes distances. La défaillance d'une usine de transfert provoque la défaillance de l'ensemble de la canalisation de transfert. Cependant, elle n'entraîne pas de zones d'impact en tant que telle. Il faudrait parler d'une défaillance simultanée d'une usine de production, et de l'ensemble des usines de transfert qui lui sont associées (une ou deux en fonction des usines en Île-de-France par exemple).

La défaillance d'une usine de production et de l'ensemble de ses usines de transfert reliées ne signifie pas une zone d'impact immédiate. Il y a bien souvent un « réservoir tampon » entre la production et la distribution qui permet d'absorber des arrêts éventuels de la production. Il n'y aurait une zone d'impact qu'au bout du temps t_1 nécessaire pour vider le réservoir compte tenu de la consommation du moment. Un modèle gravitaire pourrait alors être appliqué pour obtenir cette « zone d'impact ». Cependant, une ville n'est pas alimentée par un seul réservoir. Il y en a un certain nombre qui permettent de couvrir le territoire, et la défaillance de l'un pourra être en partie compensée par une extension du territoire de distribution des autres réservoirs fonctionnels (sur le schéma précédent : les limites entre A1, A2 et A3 ne sont pas fixes). D'autant plus qu'en cas de besoin, les opérateurs de réseaux d'eau peuvent choisir d'utiliser les réservoirs normalement prévus pour alimenter les parties hautes de la ville, et de les « vider » vers la partie basse de la ville pour compenser le réservoir défaillant en ouvrant les robinets à des points de jonction. Cette solution peut être appliquée à partir de t_1 , et dure jusqu'à t_2 compte tenu de la consommation du moment. En conclusion, considérer une zone d'impact fixe associée à une usine de production paraît peu réaliste. Il faut à chaque fois

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

détailler les capacités d'absorption ou d'adaptation (la réponse du système) pour en déduire les zones d'impact fixes avec deux phases d'évolution. Ces calculs de zone d'impact à différents moments nécessitent d'avoir un modèle hydraulique et les données techniques du réseau, ainsi que les consommations locales.

Les opérateurs savent par avance le type de réactions qu'ils utiliseraient dans les différentes situations, et possèdent des modèles hydrauliques permettant de simuler l'évolution des zones d'impact. La vraie difficulté consiste donc à structurer des scénarios de multiple défaillance pour lesquels ces opérateurs expliquent leur réaction, puis à extrapoler à partir de la base de données de ces résultats (« scénario de multiple défaillance », « zones d'impact fixes ») des comportements plus généraux. En effet, la crise étant par nature imprévisible, il est peu probable qu'elle rentre exactement dans la liste des scénarios élémentaires étudiés, mais il est possible qu'elle s'en approche. La table ci-dessous présente la liste des « scénarios élémentaires » intéressant à envisager pour le réseau d'eau décrit sur le schéma précédent.

En conclusion, il est peu pertinent de parler du couple (infrastructure, zone d'impact fixe) lorsque l'on considère le réseau d'eau. Il faut là aussi parler du couple (« scénario de multiple défaillance », « zone d'impact associée »). Or, les multiples redondances rendent nécessaires l'utilisation d'un modèle hydraulique qui prenne en compte le modèle numérique de terrain, les consommations et les capacités de production du réseau. Nous sommes donc là dans des zones d'impact évolutives et non plus fixes. Le scénario de défaillance doit alors également inclure dans sa description des éléments de contexte (horaire des défaillances, températures, durée, etc). Nous avons également vu que peu de catégories de scénarios causaient immédiatement une zone d'impact, et qu'il est possible de les identifier.

Par ailleurs, face à un scénario de crue centennale en Île-de-France et à une diminution très forte des capacités de production d'eau, le réseau d'eau potable peut être totalement reconfiguré, afin de ne garder en eau qu'un « squelette » de canalisations principales, le long desquelles se situeraient des points de distribution d'eau. Ce mode extrêmement dégradé n'est pas pris en compte lorsque l'on parle de zones d'impact car la différence de topologie entre les deux organisations est énorme.

Table 24 : Zones d'impacts par infrastructure sur le réseau d'eau potable de la Figure 45

Scénario	Zone d'impact
Double défaillance de l'usine de production P3 et de l'usine de transfert associée T2-3	<p>Zone d'impact immédiate : aucune, le réservoir S3 permet d'absorber le choc jusqu'à t_1.</p> <p>Zone d'impact secondaire (après t_1) : les usines de production P1 et P2 peuvent choisir d'augmenter la pression et d'augmenter leur zone A1 et A2 pour compenser, sur les bords, l'interruption de A3. La zone d'impact secondaire est donc inférieure à A3.</p>
Double défaillance de l'usine de production P1 et de l'usine de transfert associée T1-2	<p>Zone d'impact immédiate : aucune, le réservoir S3 permet d'absorber le choc jusqu'à t_1.</p> <p>Zone d'impact secondaire (après t_1) : les usines de production P2 et P3 peuvent choisir d'augmenter la pression et d'augmenter leur zone A2 et A3 pour compenser, sur les bords, l'interruption de P1. De plus, l'opérateur peut ouvrir les jonctions des robinets R1 et R2 pour utiliser l'eau des zones de distribution élevées vers les points bas de la zone A1. Cette solution ne dure qu'un temps (jusqu'à t_2) et à pour conséquences de diminuer la zone d'impact A1 mais de créer une rupture d'approvisionnement dans la zone plus élevée.</p> <p>Zone d'impact tertiaire (après t_2) : une fois S1, S4 et S5 vides, la zone de distribution élevée n'a plus d'eau, et un territoire légèrement moins grand que A1 n'a plus d'eau non plus.</p>
Triple défaillance de l'usine de production P2 et des usines de transfert associées T1-2 et T 2-3.	<p>Zone d'impact immédiate : aucune, le réservoir S2 permet d'absorber le choc jusqu'à t_1.</p> <p>Zone d'impact secondaire (après t_1) : les usines de production P1 et P3 peuvent choisir d'augmenter la pression et d'augmenter leur zone A1 et A3 pour compenser, sur les bords, l'interruption de A2.</p>
Défaillance d'un stockage	<p>Les aires de distribution A1, A2 et A3 peuvent être alimentées en direct par les usines de production. Il n'y a pas de zone d'impact pour S1, S2 et S3. Une défaillance de S4 ou de S5 serait plus difficile à gérer, car la pression envoyée serait bien au-dessus des normes si l'eau était injectée directement. Mais cette solution semble possible de façon temporaire.</p>
Défaillance d'une canalisation de transport entre usines	<p>Voir le scénario de la défaillance de l'usine de transfert associée.</p>

3.4.3 Réseau de distribution de gaz

Nous allons voir dans ce paragraphe si le réseau de distribution de gaz peut être approché par le couple (« scénario de multiple défaillance », « zone d'impact fixe associée »).

On distingue quatre niveaux hiérarchiques sur ce réseau : la basse pression (0 à 50 mbar), la moyenne pression A (MPA, de 50 mbar à 400 mbar), la moyenne pression B (MPB) de 400 mbar à 4 bar et la moyenne pression C (MPC) de 4 bar à 20 bar. On ne parlera ici que du réseau de distribution, et non du réseau de transport dont la pression se situe entre 20 et 100 bar.

GRDF est l'exploitant majoritaire du réseau de distribution de gaz. Dans son catalogue de prestation [GRDF, 2015], il distingue plusieurs types d'interventions en fonction de leur gravité et des personnes concernées. Lorsqu'un client signale un problème, GRDF s'engage à intervenir pour la première fois en moins « de 4 heures lorsque l'appel est reçu avant 21 heures et le matin suivant avant 12 heures lorsque l'appel est reçu entre 21 heures et 8 heures. » Le dépannage est assuré en moins de 4 heures également –quelle que soit l'heure– si « l'appel concerne un dépannage potentiellement sensible, compte tenu du risque potentiel d'incident qu'un tel dépannage présente ou est susceptible de présenter » ou si la défaillance intervient en « période de grand froid (température < 0°C) ou bien lorsqu'il s'agit d'un manque de gaz concernant une personne vulnérable (bébé, personne âgée, etc.) ».

Si le technicien doit isoler une partie du réseau de gaz, il contacte son chef d'exploitation, qui dispose du logiciel Carpathe pour lui répondre sur la meilleure conduite à tenir. Ce logiciel permet de simuler tous les scénarios de coupure en fonction des vannes répertoriées, et de comparer le nombre d'habitants impactés, ainsi que les catégories de bâtiments (écoles, hôpitaux,...) [GRDF, dossier de presse]. GRDF possède donc un logiciel qui permet de calculer par scénario les zones d'impact pour des défaillances ponctuelles.

Toutes les échelles de distribution sont maillées entre elles. Le schéma ci-dessous représente un exemple de réseau de distribution. La perte d'un poste détenteur peut être compensée par le fonctionnement d'un autre poste détenteur, dans la mesure où le circuit en aval est maillé. Il n'est donc pas possible d'estimer les zones d'impact sans avoir recours à un logiciel de simulation, et sans distinguer des scénarios de double défaillance sur ses postes détenteur.

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

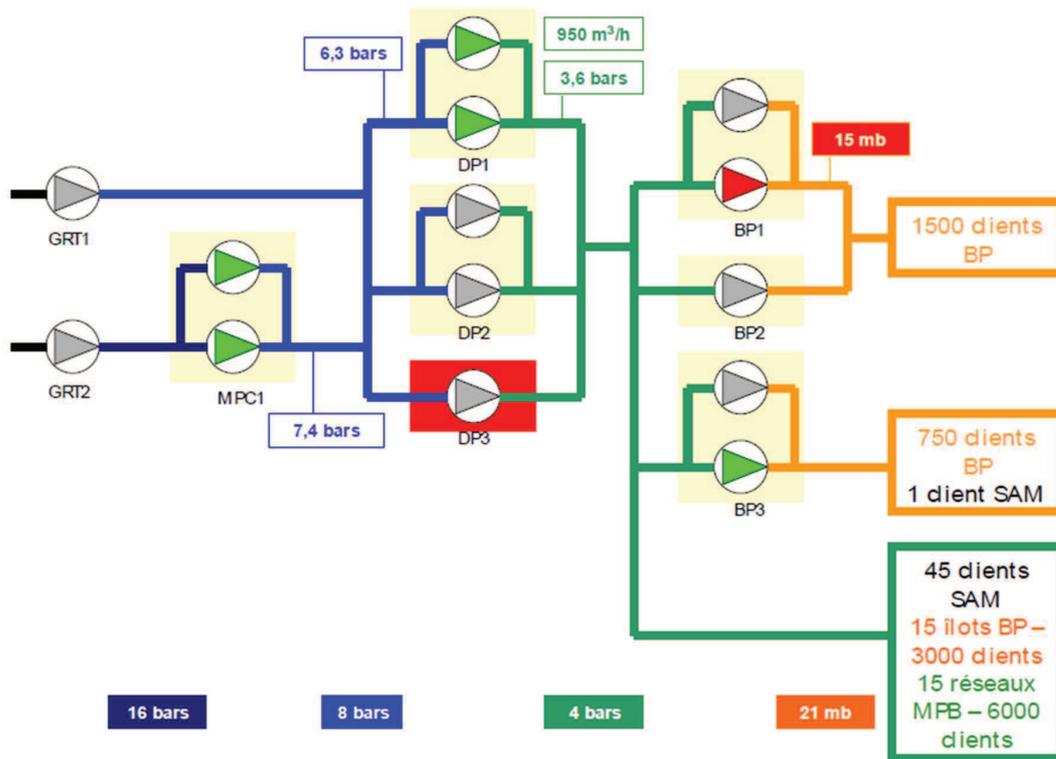


Figure 46 : Illustration du maillage du réseau de distribution de gaz [Ardouin, 2011]

Le schéma ci-dessus montre que le réseau de distribution MPA et BP possède des îlots. Cette stratégie a été utilisée par GRDF dans le cadre de l'exercice de simulation Sequana (crue centennale en Île-de-France, [Grangeat, GRDF, Observation Sequana 17/03/2016]). Isoler les parties du réseau touchées par l'inondation permet de préserver le fonctionnement des autres canalisations du risque d'avoir de l'eau dans le gaz. Une autre stratégie aurait pu être choisie par GRDF (et a été débattue lors de l'exercice Sequana). En effet, le groupe de travail a fait le choix de garder la moyenne pression en service, afin que la pression dans les tuyaux empêche une éventuelle infiltration d'eau. Les postes de détente étant conçus pour fonctionner sous l'eau, cette stratégie semble être pertinente. Cependant la violence d'une inondation pourrait créer des mouvements de terrain, et donc des arrachements et des ruptures de canalisations. Un accident de ce type serait majeur si la canalisation était en pression (4 bars). La deuxième stratégie, non choisie au cours de l'exercice, aurait été de fermer la moyenne pression, quitte à étendre considérablement le nombre de clients sans gaz. Cette deuxième solution paraît également plus cohérente avec le délai des équipes GRDF pour mettre en sécurité le réseau de distribution : il est plus facile de fermer les quelques postes détenteur de moyenne pression dans les trois jours avant la crue centennale (deuxième stratégie), que d'isoler les îlots et de fermer les très nombreux points de distributions répartis sur le territoire (première stratégie). Ce paragraphe montre que même dans le cas d'un réseau possédant un outil de simulation de ces zones d'impact, il est difficile d'établir en anticipation une liste de zones d'impact sans définir au préalable le choix de réponse du système. Il faudrait donc ajouter au couple (« scénario de défaillance », « zone d'impact ») l'élément « choix de réponse du système ».

3.4.4 Autres réseaux techniques

Le réseau vapeur a un fonctionnement analogue au réseau d'eau, sauf qu'il ne possède pas de capacités de stockage de la vapeur. Les usines de production ont une capacité maximale de « pousse » dans le réseau, donc on peut établir une zone maximale de distribution par usine, mais difficilement une zone d'impact « fixe ». En corrélation, il devrait être possible d'avoir une « zone d'impact minimale » par usine.

Le réseau de télécommunications filaire est entièrement compatible avec la notion de zone d'impact fixe. Tous les abonnés en aval d'une défaillance n'auront plus accès au réseau. En revanche, le réseau de télécommunications mobiles peut compenser partiellement la perte de certains de ces BTS (Base Transceiver Station). Là encore, il faut travailler au cas par cas. Si la double ou la triple défaillance de BTS concerne la même zone de couverture, alors il y a un risque d'apparition de zone d'impact. En revanche aucune information récoltée n'indique que les MSC (Mobile Switching Center ou centre de commutation des services mobiles) sont des infrastructures doublées. Si ce n'était pas le cas, il serait possible d'attribuer à ces MSC des zones d'impact fixes.

3.4.5 Limites opérationnelles d'une base de données orientée graphe à l'échelle de l'infrastructure pour la modélisation d'effets cascade

Une infrastructure possède une zone d'impact fixe s'il est possible de définir, par avance, l'étendue de la zone privée de service suite à la défaillance de l'infrastructure. La notion de zones d'impact fixes semble s'appliquer à un nombre très restreint de situations : les infrastructures du réseau de téléphonie fixe, les infrastructures de réseau électrique à simple dérivation sans possibilité de reconfiguration, les MSC non doublés du réseau de téléphonie mobile.

Le réseau électrique semble être plus adapté à une approche par les couples (« scénario de multiple défaillance », « zone d'impact fixe associée »). Le réseau d'eau potable doit lui être approché par le couple (« scénario de multiple défaillance », « zone d'impact évolutive associée »). Quant au réseau de gaz, il est difficile d'établir en anticipation le choix de réponse du système. Il faudrait donc ajouter au couple (« scénario de défaillance », « zone d'impact évolutive ») l'élément « choix de réponse du système ».

L'infrastructure ne peut pas être considérée indépendamment du réseau technique auquel elle appartient dans de nombreux cas. L'utilisation d'une base de données orientée graphe à l'échelle de l'infrastructure n'est alors pas pertinente pour les infrastructures dépendantes de la reconfiguration du réseau pour calculer leur zone d'impact. En effet, une base de données orientée graphe n'est pas conçue pour modéliser ces reconfigurations techniques. Il faut alors s'appuyer sur les simulateurs spécifiques aux réseaux pour calculer les zones d'impact évolutives, dédié à un scénario de défaillance et non plus simplement à une infrastructure, afin de modéliser les effets cascade.

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

Cette section montre qu'il faut envisager une zone d'impact évolutive en fonction de la redondance du réseau, du choix de réaction du système et du scénario. Il apparaît donc nécessaire de s'intéresser au triptyque (« scénario de défaillance », « choix de réponse du système », « zone d'impact évolutive ») pour modéliser les effets cascade.

Concernant le premier élément de ce triptyque, il est évident que l'on ne peut pas établir une base de données exhaustive de l'ensemble des scénarios. Il serait néanmoins intéressant de reprendre les classes de scénarios développées dans le 3.1, et de sélectionner en premier lieu les scénarios qui correspondent à l'analyse des menaces du territoire faite par la sécurité civile. Cette analyse des menaces est cependant en dehors du cadre de cette thèse. Le choix de réponse du système face aux scénarios (deuxième élément) fait partie de la stratégie de résilience définie par les entreprises. Il est donc nécessaire de mieux appréhender cette caractéristique, et ce point sera approfondi dans le chapitre 4.

La constitution des zones d'impact évolutives (troisième élément du triptyque) nécessite d'utiliser les simulateurs spécifiques hébergés par les opérateurs des réseaux. Or, ces simulateurs spécifiques ne sont actuellement pas couplés entre plusieurs réseaux, et ne peuvent pas sans un couplage modéliser des effets cascade. Nous avons vu dans le chapitre 2 que le projet DIESIS prouvait la faisabilité technique de créer un super simulateur regroupant les différents simulateurs spécifiques, et hébergé par la sécurité civile. Cependant, nous avons vu également l'importance de s'appuyer sur l'expertise des gestionnaires de réseaux pour chaque simulation, et l'importance de minimiser le nombre de données techniques à héberger et à mettre à jour dans une super structure. C'est pourquoi la section suivante explore la faisabilité d'un couplage faible entre simulateurs, permettant à la sécurité civile de ne garder que les résultats de simulation d'effet cascade, et aux opérateurs de rester maître des simulations demandées.

3.5 Démonstration de faisabilité d'un couplage faible entre simulateurs spécifiques pour la modélisation d'effets cascade

Nous avons vu précédemment que l'évolution des zones d'impact en fonction du temps était un facteur important à prendre en compte pour certains réseaux. Il existe pour chaque réseau technique des simulateurs spécifiques capables chacun de calculer ces évolutions de façon indépendante : simulateur de réseaux électriques, de réseaux d'eau potable, de gaz, etc. Leur maniement nécessite de l'expertise et surtout une base de données à jour. Le chapitre 2 a mis en évidence à la fois le défi que représentait pour un organisme de sécurité civile l'entretien d'une base de données concaténant plusieurs sources techniques détaillées, et l'importance de s'appuyer sur l'expertise hébergée chez les opérateurs de réseaux techniques. C'est pourquoi cette section propose une architecture de simulation qui respecte la contrainte de garder les simulateurs - et donc les données techniques - chez les opérateurs, et de n'héberger que des résultats de simulations, par catégorie de scénarios, à la sécurité civile.

3.5.1 Méthode générale

Le couplage proposé correspond à une utilisation successive de simulateurs spécifiques à chaque réseau. Les interfaces se font via l'utilisation des « zones d'impact » calculées. Les simulateurs prennent chacun en données d'entrée les zones de défaillance de service du réseau amont (zone d'impact) dont ils sont dépendants, et produisent leurs propres zones de défaillance comme résultat. Il s'agit d'un couplage faible car la méthode ne propose pas de rétroaction. Par exemple, une fois calculées les zones sans électricité, elles ne seront pas impactées par les autres résultats de simulation. La méthode respecte les contraintes de données et d'expertises car l'utilisation des zones d'impact comme intermédiaires permet aux opérateurs de mener leur analyse de conséquences sur leurs infrastructures en autonomie, et l'expertise nécessaire aux simulations restent la propriété des opérateurs.

La figure ci-dessous illustre la méthode de ce couplage faible. Un scénario se résume ainsi à un ensemble de zones d'impacts, fruits d'un effet cascade, données simples à représenter sur une carte, compréhensible par les acteurs de la sécurité civile et utilisable dans le cadre de la planification de la gestion de crise.

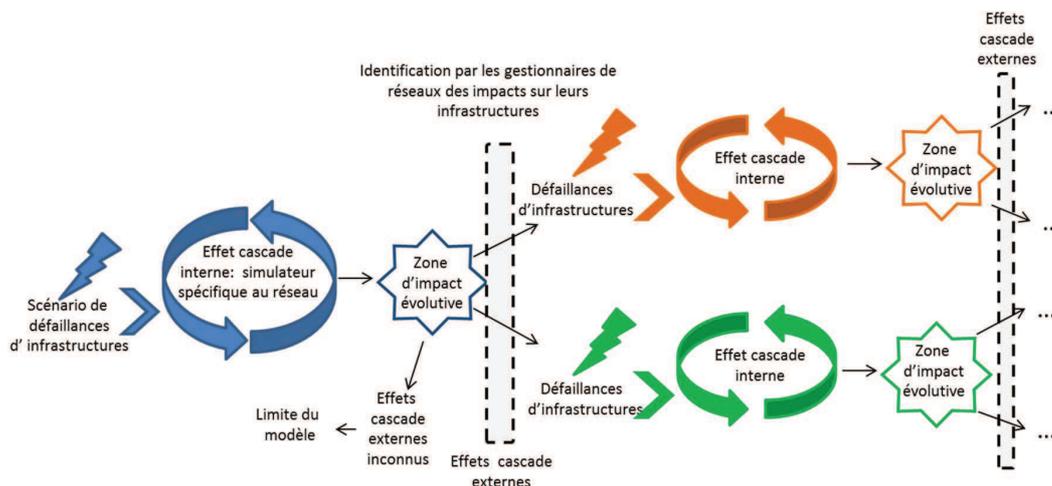


Figure 47 : Schéma des enchaînements d'effets cascade interne/zone d'impact/effet cascade externe

L'étude successive de ces zones d'impact nécessite une hiérarchisation des opérateurs dans leurs calculs de zones d'impact. Celle-ci est discutée dans la partie 3.5.4. La section 3.5.2 a pour but d'illustrer la faisabilité de la méthode à travers une application et d'identifier les difficultés qui sont relatives au couplage faible par zones d'impact. Dans le cas du réseau d'eau, la dynamique d'évolution des zones d'impact (de l'ordre de l'heure) permet aux autorités d'avoir le temps de mettre en place des stratégies si cette évolution leur est connue. Il est donc intéressant de constituer une base de données comprenant à la fois les scénarios et les évolutions de ces zones. Les réseaux d'eau potable sont électro-dépendants sur les territoires plats pour le remplissage des réservoirs (château d'eau ou réservoirs au sol) via des pompes, mais également pour les asservissements comme les vannes motorisées. Ce

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

paragraphe propose de modéliser l'effet cascade « coupure d'électricité » → « conséquences sur le réseau d'eau » à l'aide d'un couplage faible entre une zone d'impact sans électricité et un modèle hydraulique appelé Porteau. Ce logiciel, développé par l'IRSTEA, est un outil de modélisation du comportement d'un réseau maillé de distribution ou de transport d'eau sous pression. Il est utilisé par différentes collectivités pour le dimensionnement et la gestion de leur réseau de distribution d'eau potable. Le but est ici de montrer comment transcrire une zone d'impact d'électricité en une série temporelle de zones d'impact hydraulique, exploitable dans le cadre de la planification ou de la gestion de crise (séquences courtes de modélisation).

Le logiciel Porteau ne fournit pas de zones d'impact en résultat, mais des évolutions de pression, débit, et hauteur piézométrique aux différents points des réseaux. Le travail réalisé ci-après permet de transformer ces résultats bruts en zones d'impact exploitables dans le cadre d'un couplage faible entre simulateurs. Le territoire d'application choisi est un réseau fictif mais réaliste. En effet, dans le cadre du projet RESIWATER² [ANR, RESIWATER, 2015], plusieurs exploitants de réseaux d'eau (Veolia Île-de-France, Strasbourg Eurométropole, Berlin) ont présenté leurs résultats réels de simulation, mais ces données sont sensibles et non présentables dans le cadre d'une publication ouverte. Le paragraphe ci-dessous présente le choix du territoire et la construction de ce réseau réaliste. Le paragraphe suivant présentera quant à lui les résultats de simulations de Porteau sur ce territoire - avec et sans électricité. Le troisième paragraphe discutera de la différence d'évolution de ces zones en fonction de l'heure de la panne d'électricité, de sa durée, et de la différence locale d'autonomie entre les indicateurs au niveau macro (le territoire présente sur l'ensemble de sa superficie un stockage équivalent à 12h de réserve pour la consommation prévue) et les autonomies locales constatées après modélisation.

3.5.2 Application à un scénario de coupure d'électricité sur un réseau de distribution d'eau fictif construit sur la base du réseau de Saint-Nazaire

Le travail précédent sur le réseau électrique (section 3.4) a mis en évidence la difficulté de calculer une zone réelle d'impact d'une coupure d'électricité associée à une défaillance d'un poste source. Suite aux protestations syndicales de 2016, un groupe de manifestants a coupé le courant pendant une heure au niveau du poste source de Saint-Malo-de-Guersac, au nord de Saint-Nazaire, en Loire-Atlantique. Les communiqués de presse qui ont suivi ont permis d'identifier l'étendue réelle de la zone d'impact associée à ce poste source, même si la très faible durée n'a pas entraîné de conséquences sur le réseau de distribution d'eau. Il est à noter que ce poste source se situe au bout d'une antenne du réseau de transport d'électricité, et qu'il n'avait donc pas de possibilité pour les habitants des bords de mer d'être alimentés par un autre poste source (pas de possibilité de reconfiguration). Environ 120 000 foyers ont été privés d'électricité. C'est donc sur ce territoire que nous avons choisi de simuler un réseau d'eau et l'impact d'une coupure d'électricité longue (entre 4 et 12 h).

La base de données BDTOPO ®V2.1 [IGN, BDTOPO, 2015] possède la description des bâtiments servant au réseau hydraulique : emplacement, cote, hauteur et superficie des

² http://www.agence-nationale-recherche.fr/projet-anr/?tx_lwmsuivibilan_pi2%5BCODE%5D=ANR-14-PICS-0003

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

bâtiments sont disponibles pour les châteaux d'eau et les réservoirs au sol. Nous avons fait l'approximation que la surface multipliée par la hauteur des bâtiments « réservoir au sol » corresponderaient aux dimensions de la cuve. Pour les dimensions des châteaux d'eau, nous avons adapté la hauteur intérieure de la cuve en fonction des consommations locales d'une demi-journée et de la superficie connue du bâti (interprétée comme la surface de la cuve), et déduit la cote du radier de la cuve grâce à la hauteur du bâtiment. La consommation de l'ensemble du bassin de Saint-Nazaire est estimée à 80 000 m³ par jour hors jour de pointe [Carene, Sécurisation, 2015]. Grâce à la base de données GEOFLA®V2.1 [IGN, GEOFLA, 2015], nous connaissons la population par commune. Les 80 000 m³ d'eau consommée par jour ont donc été répartis entre les 16 communes concernées au *pro rata* de leur population. Nous savons par ailleurs que ce bassin est alimenté au minimum par trois sources : Férel à 25 %, Campbon (pour la majorité) et Nantes pour une plus faible partie [Carene, origine, 2016]. En revanche, il n'y a pas d'indications sur internet de tracé des canalisations de transport, qui relient les différents châteaux d'eau et réservoirs, ni sur les canalisations de distribution. Les canalisations de transport ont donc été imaginées pour relier de façon cohérente les infrastructures de stockage entre elles, mais ce tracé est fictif. De même, les canalisations de distribution ont été approximées par le tracé des routes de ces communes avec des diamètres plus ou moins importants en fonction de l'importance de la route. Le tracé des routes provient de la base de données BDTOPO®V2.1. Les canalisations de distribution et de transport forment un réseau d'eau de 800 km sur l'ensemble du territoire (410 km²). La carte ci-dessous présente les communes concernées par la coupure d'électricité, le positionnement des sources et le réseau de transfert imaginé pour relier les différentes infrastructures. La **Figure 49** présente l'ensemble du réseau et les points de stockage avec leurs noms. Le réseau de distribution représenté correspond en réalité au réseau des routes principales sur les communes concernées.

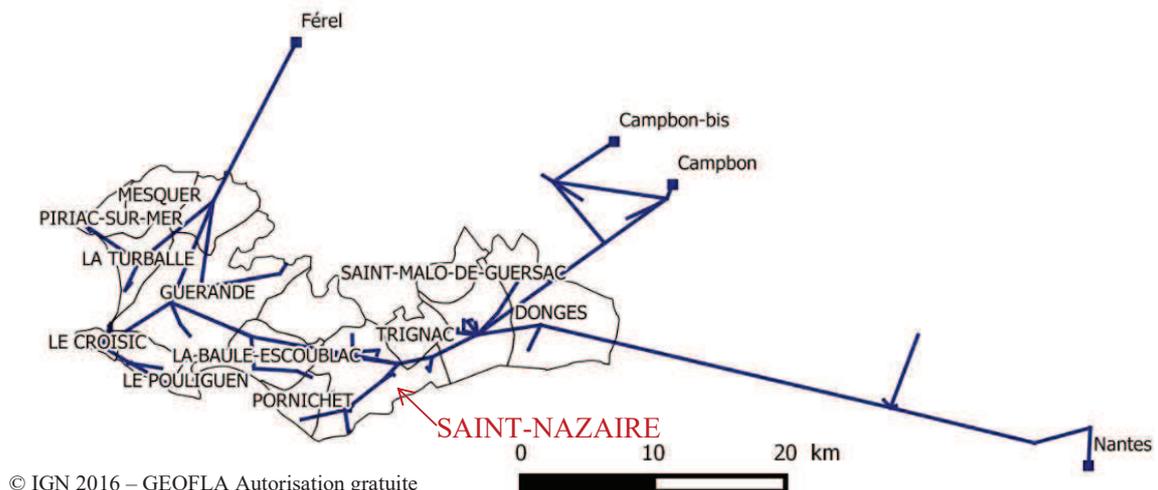


Figure 48 : Communes privées d'électricité, sources d'approvisionnement et réseau fictif de transport d'eau

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

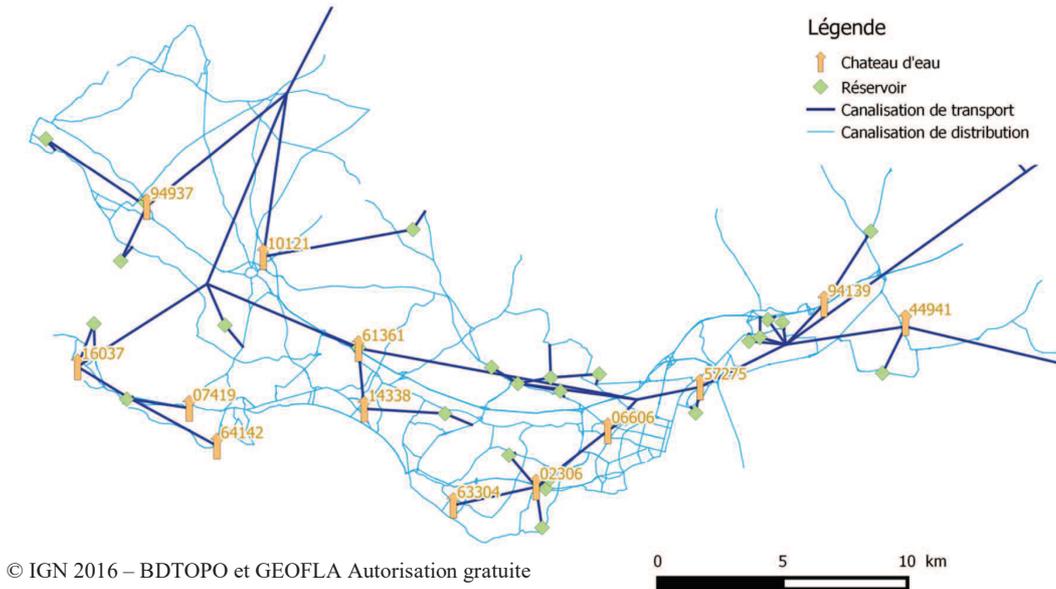


Figure 49 : Réseau de transport d'eau, réseau de distribution, et infrastructures de stockage

Les routes présentées ci-dessus n'incluent pas les petites voies qui desservent les habitations à proprement parler. En effet, leur densité est trop importante et leur simulation apporte un degré de détail trop élevé par rapport à la recherche de zones d'impact un peu plus générales. En revanche, à chaque fois qu'une route pavillonnaire se connecte sur le réseau routier, nous avons défini un point de consommation (voir la carte ci-dessous). Cette méthode permet de garder la répartition de la densité des points de consommation sur le territoire. La consommation effective attribuée à ces points a été pondérée en fonction de la consommation journalière de la commune à laquelle ils appartiennent et du nombre de points dans la commune. Le tableau ci-dessous renseigne, par commune, la population, la consommation et le nombre de points recensés sur son territoire. Les communes avec un centre urbain dense comme Saint-Nazaire possèdent plus de points de consommation.

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

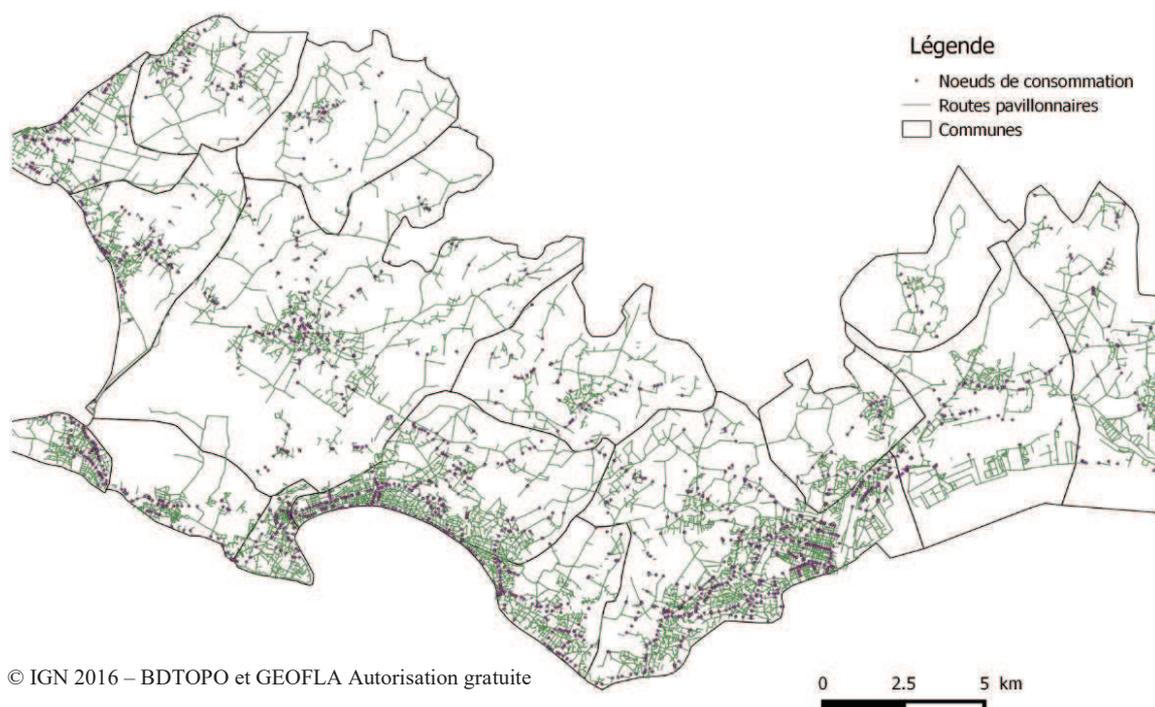


Figure 50 : Répartition des points de consommation associés aux routes pavillonnaires de la zone d'étude

Table 25 : Communes touchées par la coupure d'électricité, et consommation d'eau associée

Communes	Population	Nombre de points de consommation	Consommation journalière communale en m ³ /jour
BATZ-SUR-MER	3030	56	1493.99076
DONGES	7092	79	3496.82589
GUERANDE	15722	167	7751.98767
LA BAULE-ESCOUBLAC	15474	229	7629.70724
LA TURBALLE	4554	79	2245.42373
LE CROISIC	4040	71	1991.98767
LE POULIGUEN	4810	64	2371.64869
MESQUER	1759	47	867.30354
MONTOIR-DE-BRETAGNE	6950	71	3426.81048
PIRIAC-SUR-MER	2173	62	1071.43297
PORNICHET	10323	106	5089.92296
SAINT-ANDRE-DES-EAUX	5607	45	2764.6225
SAINT-MALO-DE-GUERSAC	3215	9	1585.20801
SAINT-MOLF	2408	30	1187.30354
SAINT-NAZAIRE	67940	475	33498.9214
TRIGNAC	7153	36	3526.90293

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

Le modèle de consommation proposé transforme la consommation journalière en m^3 de chaque point en une consommation en L/s répartie de 8h à 20h, afin de simuler les périodes de consommations journalières, et les périodes nocturnes durant lesquelles les réservoirs se remplissent. Une précision au millième de litre par seconde a été choisie afin d'être le plus cohérent possible. Néanmoins, au vu de la durée de la simulation (12 h) et du nombre de points consommateurs (1600), cette précision entraîne au bout d'une journée un écart de $15\,000\text{ m}^3$ et on constate que $95\,000\text{ m}^3$ ont effectivement été consommés sur la journée de simulation au lieu des $80\,000\text{ m}^3$. Dans la mesure où l'on cherche un réseau réaliste et non pas réel, les consommations n'ont pas été ajustées avec une précision plus grande. D'autant plus que les consommations journalières en période de pointe sont estimées à environ $110\,000\text{ m}^3$. La consommation effective est donc réaliste.

La BDTPOPO ®V2.1 fournit la cote au sol des infrastructures de stockage, et la cote des points de consommation est approximée par la cote moyenne de la commune à laquelle ils appartiennent (données fournies par GEOFLA®V2.1).

Afin d'établir un équilibre hydraulique entre les différents réservoirs et les points de consommation, il a été nécessaire de rajouter de nombreux équipements hydrauliques au réseau simulé sous Porteau. L'introduction mentionnait les équipements électro-dépendants comme les pompes ou les vannes motorisées qui stoppent le remplissage lorsque le niveau maximum du réservoir aval est atteint. D'autres équipements sont présents sur le réseau, comme des limiteurs de débit, des obstacles à l'écoulement ou encore des clapets, mais ceux-ci ont un fonctionnement uniquement mécanique et ne seront pas impactés par une coupure d'électricité. Le tableau ci-dessous résume le nombre d'infrastructures et d'équipements installés sur le réseau, ainsi que le nombre de points de consommations. On a sur l'ensemble du territoire une capacité de stockage en réservoir équivalente à celle de stockage en château d'eau, équivalente elle-même à une demi-journée de consommation. Il est important de souligner que pour les besoins de la démonstration, l'utilisation de vannes motorisées (donc électro-dépendantes) a été privilégiée par rapport à l'utilisation de vannes de contrôle de niveau altimétrique, de fonctionnement mécanique et qui jouent le même rôle (lorsque le niveau haut d'un réservoir est atteint, elle se ferme par calibrage altimétrique). Nous avons supposé un écoulement uniquement gravitaire depuis les réservoirs vers les points de consommation.

Table 26: Description des infrastructures et des équipements du réseau fictif

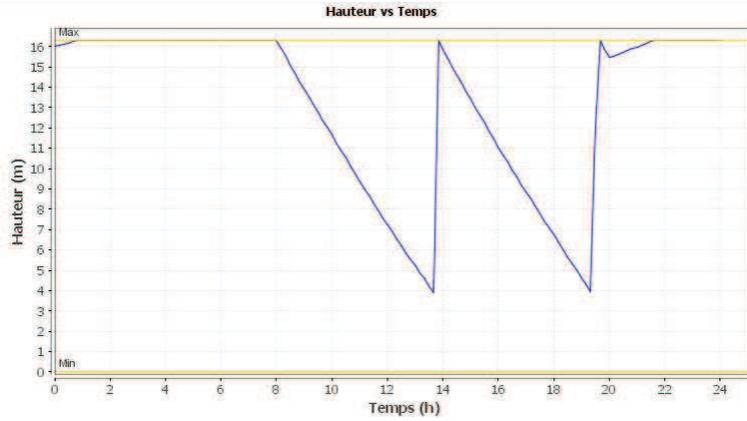
Tronçons	6236, représentant 796 km de linéaire
Nombre de mailles du réseau	799
Nombre d'équipements hydrauliques sur les tronçons	100
Dont :	
- Clapets	29
- Limiteurs de débit	21
- Pertes de charges singulières (obstacle à l'écoulement)	3
- Pompes	19
- Vannes motorisées	28
Nœuds (toutes catégories confondues)	5438
Nœuds consommateurs	1608 (95 000 m ³ consommés effectivement)
Réservoirs	45 (soit 85 500 m ³)
Dont :	
- Châteaux d'eau	17 (42 200 m ³) dont 4 reliés aux sources et hors zone de coupure d'électricité
- Réservoirs au sol	28 (43 300 m ³)
Sources	4 (Férel, Campbon, Campbon bis et Nantes)

Les différents résultats de simulation obtenus sur une journée classique (de minuit à minuit) pour les treize châteaux d'eau sont présentés en Annexe 5. Trois courbes sont présentées dans le tableau ci-dessous. Les oscillations obtenues sont dues à des déclenchements et aux arrêts des pompes ou des vannes motorisées en aval du réservoir considéré. Il est à noter qu'au début de la simulation, les châteaux d'eau sont presque remplis, mais que certains réservoirs le sont seulement à moitié, pour observer la phase de stabilisation entre les stockages avec le début des consommations à 8 h.

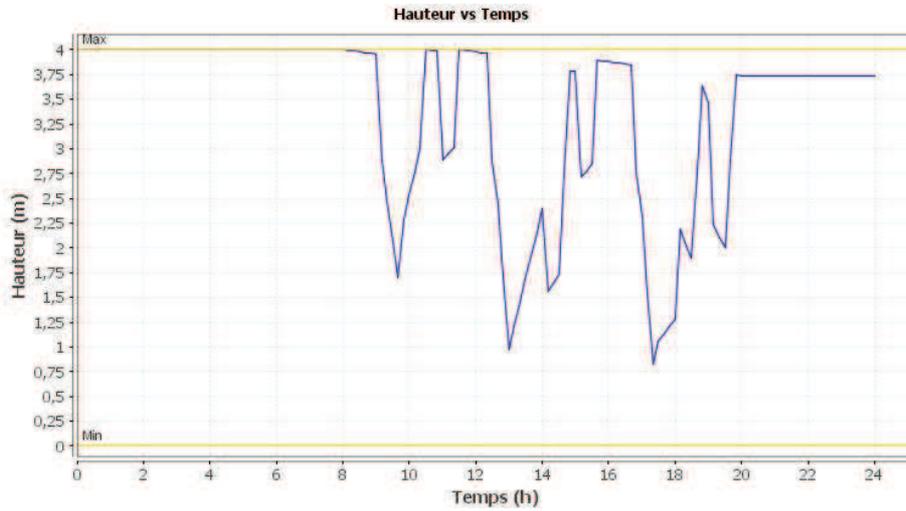
Sur les 13 courbes en annexe, on observe des périodes d'oscillations relativement différentes, avec des châteaux d'eau qui sont plus ou moins en difficulté tout au long de la journée. Le C94139, de très faible hauteur de cuve, est très sollicité de façon brutale vers la fin de la journée, et il a peu de marge de manœuvre, alors que le C61361, le C57275 et le C94937 ont une marge de manœuvre bien plus large sur l'ensemble de la période de consommation. Ce sont ces sensibilités et leur dépendance au fonctionnement des pompes qui vont être des facteurs influençant l'autonomie locale face à une coupure de courant. De plus, au vu des oscillations de hauteur constatées au cours de la journée, l'influence de l'heure de la panne électrique doit être analysée afin de déterminer si c'est un facteur prépondérant.

Table 27 : Variations de hauteur d'eau dans les châteaux d'eau au cours d'une journée sans panne électrique

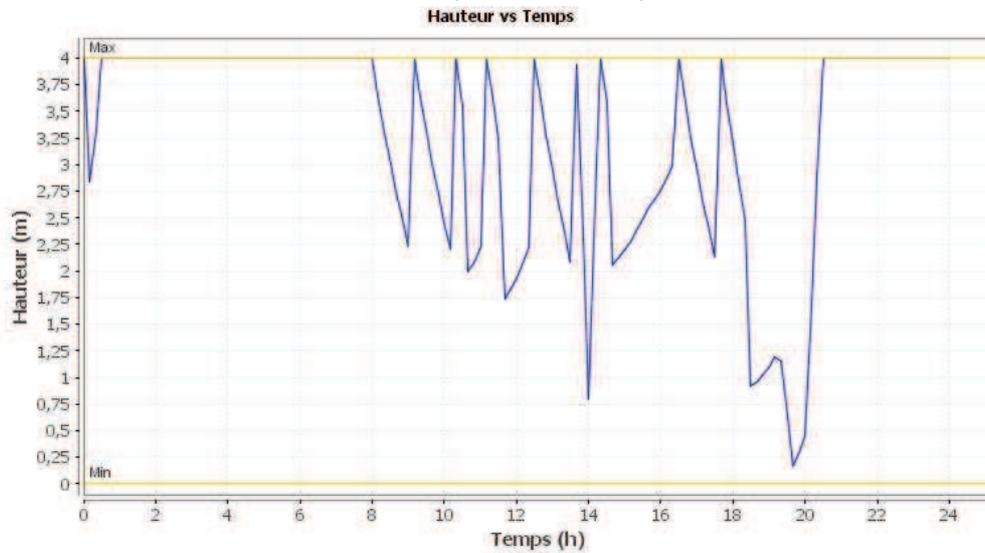
C44941 (cuve de 1400 m³)



C06606 (cuve de 3650 m³)



C94139 (cuve de 814 m³)



3.5.3 Etude des facteurs d'influence sur les autonomies locales et comparaison des indicateurs d'autonomie généraux et locaux.

Plusieurs scénarios sont étudiés ici, mais tous concernent une panne d'électricité sur l'ensemble de la zone desservie par le poste source de Saint-Malo-de Guersac. Le tableau ci-dessous illustre l'ensemble des scénarios qui devraient être considérés lors de la recherche de modélisation des effets cascade. Seuls les deux premiers scénarios sont présentés dans ce travail. Le troisième scénario est une perspective de ce travail de thèse.

Table 28 : Scénarios d'effets cascade étudiés

Scénario	Objectif
1 : Coupure d'électricité à 7h30 (après stabilisation des réservoirs non pleins tels que définis à l'instant minuit), d'une durée indéterminée	Identifier les seuils locaux d'autonomie avant vidange de chaque château d'eau. Comparer ces seuils avec l'indicateur général (capacité de stockage égale à une demi-journée de consommation, correspondant à une pénurie 6 heures après le début de la consommation soit 14h).
2 : Coupure d'électricité à 7h30 d'une durée de 1 heure, puis de 2 heures, puis de 3 heures.	Identifier le seuil d'autonomie réel du territoire face à une pénurie d'électricité à 7h30 (heure à laquelle le premier réservoir se vide totalement) et les réservoirs qui constituent les points faibles du territoire.
3 : Coupure d'électricité à 14h d'une durée de 1 heure, puis de 2 heures, puis de 3 heures.	Tester l'influence de l'heure de la panne sur le seuil d'autonomie réel du territoire face à une pénurie d'électricité et sur l'identification des points faibles du territoire.

Pour comprendre l'influence de l'électricité, deux tables dans l'Annexe 5 représentent les liens entre les pompes, les vannes motorisées et les châteaux d'eau et réservoirs au sol pour les équipements présents dans la zone de coupure (15 pompes sur 19 et 28 vannes motorisées). Une dernière table résume, dans l'Annexe 5, par château d'eau, les équipements électro-dépendants en amont et en aval. Tous les châteaux d'eau présents dans la zone de coupure d'électricité possèdent au moins un équipement électro-dépendant en amont ou en aval.

Scénario 1

Une panne d'électricité entraîne le dysfonctionnement des pompes et des vannes motorisées à 7h30. Pour rappel, certains équipements sont équipés de batteries. Ici, nous jouons simplement l'effet de leur arrêt. Si nous estimons que les batteries permettent de tenir environ 2 heures supplémentaires, un dysfonctionnement des équipements à 7h30 correspondrait à une coupure d'électricité à 5h30. C'est pourquoi il n'y a pas de mentions de ces batteries dans les scénarios ci-après.

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

Deux cas existent lors d'une coupure d'électricité pour les vannes motorisées : soit leur position de référence est en position ouverte, soit elle est en position fermée. Les deux cas ont été simulés ci-dessous. L'option la plus probable reste que les vannes motorisées soient en position fermée par défaut, car sinon cela siphonne les réservoirs amont par débordement des réservoirs aval, comme la simulation ci-dessous le montre. Un troisième scénario a été simulé : après une heure de panne électrique, les équipes du gestionnaire de réseau d'eau parviennent à manipuler de façon manuelle les vannes. Il s'agit du scénario 1ter. Aucun scénario n'est associé ici à la remise en route des pompes à l'aide de groupes électrogènes car cela équivaut au scénario 2 d'une coupure d'électricité restreinte dans le temps.

Scénario 1, position des vannes motorisées par défaut fixée à « ouverte »

La **Table 29** illustre bien la diversité des rapidités de vidange. Elle résume par château l'heure à laquelle la hauteur passe sous le niveau minimum et la durée d'autonomie associée. Celle-ci est calculée par rapport à 7h30, car nous avons supposé que les vannes sans électricité se mettaient par défaut en position ouverte.

Table 29 : Autonomie des châteaux d'eau lorsque les vannes motorisées sont en position ouverte par défaut

Château	Durée d'autonomie (Repère = 7 :30)	Heure de vidange totale
C02306 (cuve de 3400 m ³)	0 :20	7 :50
C06606 (cuve de 3650 m ³)	3 :50	11 :20
C07419 (cuve de 500 m ³)	1 :00	8 :30
C10121 (cuve de 580 m ³)	0 :20	7 :50
C14338 (cuve de 2500 m ³)	3 :10	10 :40
C16037 (cuve de 740 m ³)	0 :30	8 :00
C44941 (cuve de 1400 m ³)	4 :50	12 :20
C57275 (cuve de 7200 m ³)	1 :50	9 :20
C61361 (cuve de 1770 m ³)	1 :20	8 :50
C63304 (cuve de 300 m ³)	1 :40	9 :10
C64142 (cuve de 265 m ³)	2 :10	9 :40
C94139 (cuve de 814 m ³)	0 :40	8 :10
C94937 (cuve de 1465 m ³)	0 :20	7 :50

Ce scénario est extrême car en maintenant les vannes en position ouverte, cela vide les châteaux d'eau dans les réservoirs, qui débordent en grande quantité. Ce n'est donc pas la consommation qui est responsable de cette faible autonomie. La position par défaut des vannes est probablement plutôt une position fermée, mais cette simulation en position ouverte permet d'illustrer la différence d'autonomie obtenue en fonction de la configuration des vannes.

Scénario 1bis, position des vannes motorisées par défaut fixée à « fermée »

Le scénario 1bis est le même que le 1, mais la position par défaut des vannes est fixée à « fermée » après 7h30. Le calcul diverge à 13h15 (plus de 80 % des réservoirs sont vides), donc aucun seuil d'autonomie supérieur à 13h15 n'est calculé. Ce scénario est plus crédible

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

car en cas de débordements, il reste toujours la possibilité de forcer la fermeture au cas par cas, comme le montrera le scénario 1ter.

Environ les deux tiers des réservoirs sont vides en quatre heures. On est donc loin des 6 heures d'autonomie (équivalents à une demi-journée de consommation) que l'on pourrait estimer en regardant uniquement l'indicateur général du volume de stockage vis-à-vis des consommations journalières. La **Figure 53** présente l'évolution spatio-temporelle de la disponibilité de l'eau aux points de consommation telle que l'a calculée Porteau. Deux tableaux en annexe décrivent l'autonomie des réservoirs et des châteaux d'eau pour le scénario 1bis. Ils montrent que les châteaux d'eau C63304, C07419, C61361 et C94139 sont des points vulnérables face à une coupure de courant. Ils ont un faible volume de stockage, sont exposés à la consommation directe de la distribution, et leur alimentation par des vannes ouvertes est primordiale. Les différences d'autonomie des châteaux d'eau sont représentées sur les cartes de la **Figure 51** et la **Figure 52**. Les châteaux qui tombent dans un premier temps sont ceux en bout de canalisation de transport. Le château C7419 tombe en premier après 1 h (commune de Batz sur Mer), accélérant très légèrement le débit de sortie du C64142 après 8h30 (+10 % de débit sortant). La commune de Pornichet avec le C63304 est également rapidement impactée, tout comme l'ouest de Saint-Nazaire. La fermeture des vannes motorisées empêche les autres châteaux d'eau de se vider dans les réservoirs. C'est donc l'autonomie des réservoirs qu'il faut juger face à ce scénario, visible dans la table en annexe et sur la **Figure 53**.

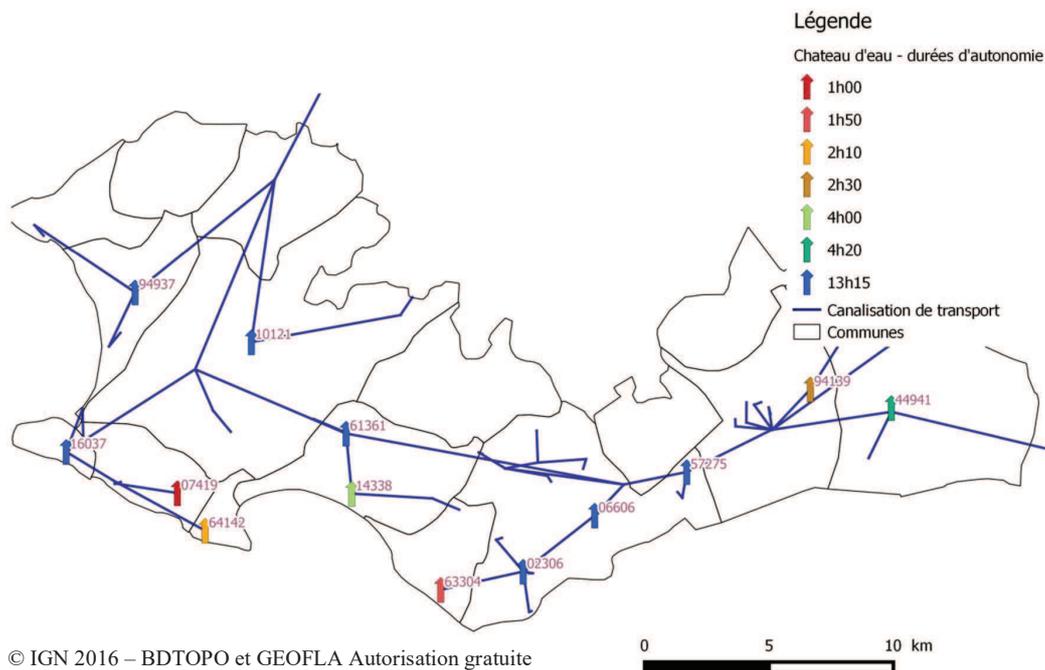


Figure 51 : Carte des châteaux d'eau et de leur autonomie pour le scénario 1bis (vannes motorisées fermées)

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

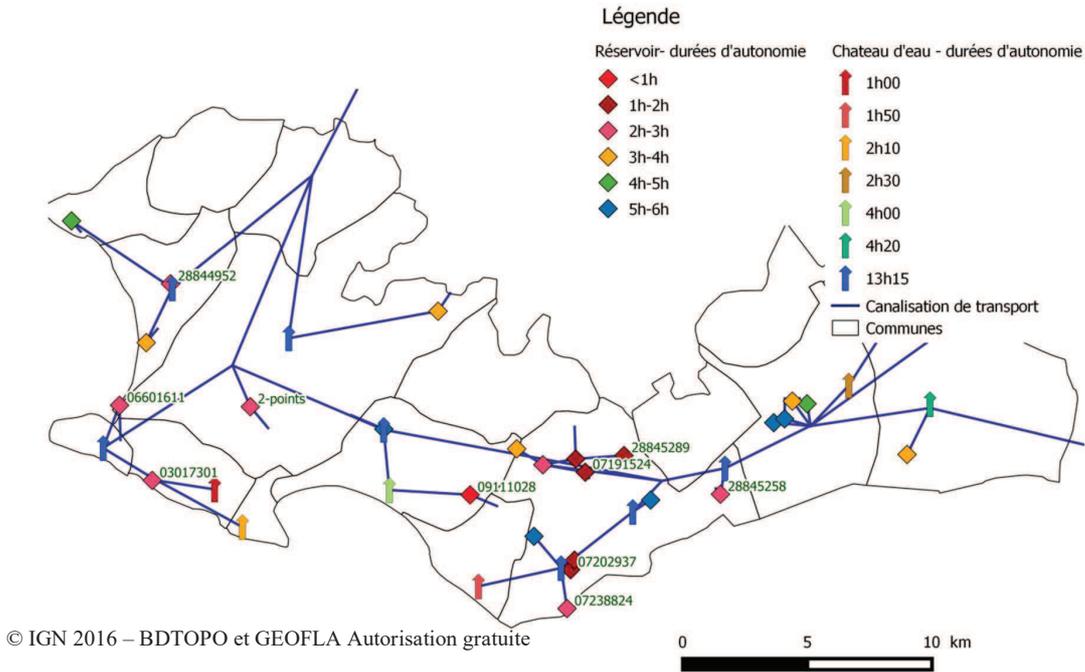


Figure 52 : Carte des châteaux d'eau des réservoirs avec leur autonomie pour le scenario 1 bis (vannes motorisées fermées). Les réservoirs avec une autonomie de moins de 4 heures ont une étiquette avec leur nom.

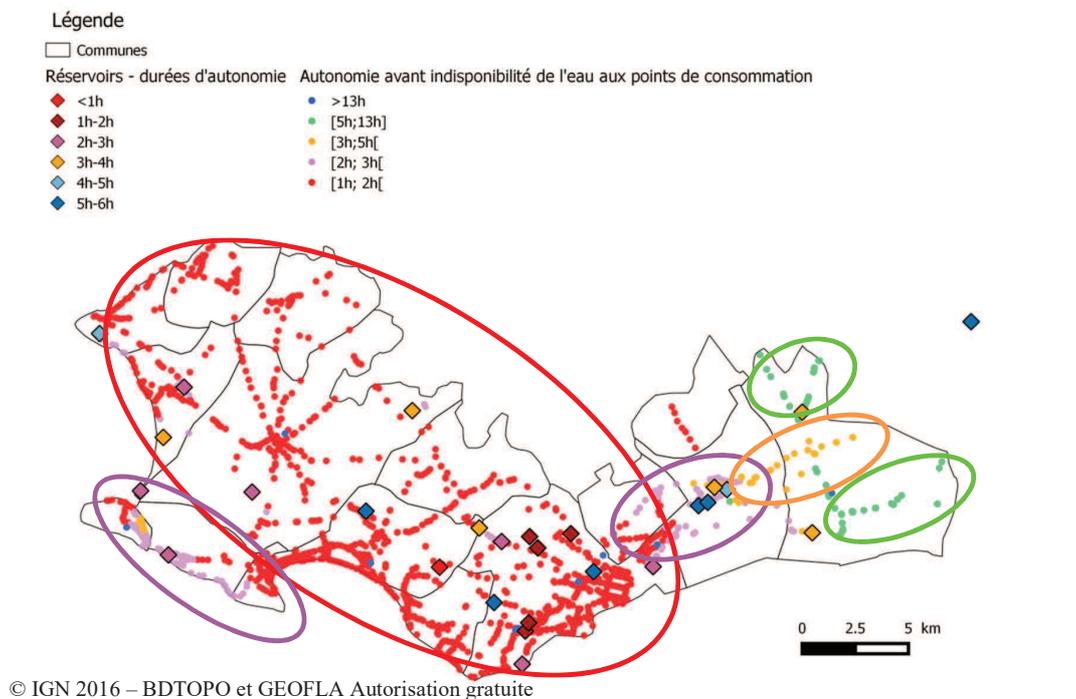


Figure 53 : Evolution de la disponibilité de l'eau aux points de consommation et zones d'impact évolutives

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

Le territoire présenté ci-dessus ne décrit pas un réseau d'eau réel, il reste quelques incohérences dues à un mauvais dimensionnement du réseau fictif. Par ailleurs, le scénario suivant montre qu'une intervention humaine pour assurer une manipulation des vannes (certains châteaux d'eau ont encore de l'eau dans les zones privées d'eau) change l'évolution de la répartition des points de consommation défaillants. C'est ce que nous allons simuler dans le paragraphe suivant. Néanmoins, il est déjà possible de parler de zones d'impact évolutives. Elles sont représentées sur la **Figure 53** pour le scénario 1bis. Leur connaissance, même approximative, serait un plus pour la planification ou la gestion d'une crise d'un point de vue de la sécurité civile, vis-à-vis du risque de manque d'eau. Ce scénario permet également de mettre en évidence qu'une analyse générale, qui considère uniquement le volume total des stocks d'eau disponibles sur le territoire, ne permet pas de refléter les différences d'autonomies locales d'accès à l'eau courante face au scénario considéré.

Scénario 1ter : les pompes restent défaillantes, mais les vannes fonctionnent après 8h30 (approximation d'une gestion manuelle des vannes, le délai correspond à un déploiement des équipes d'interventions du gestionnaire de réseau d'eau)

Le calcul de ce scénario diverge après 18h30 avec Porteau (trop de réservoirs vides). L'autonomie des châteaux et des réservoirs est présentée ci-dessous. Comme les réservoirs sont de nouveau alimentés par les châteaux après 1 heure, les châteaux qui n'étaient pas vides au scénario 1bis se vident ici. Pour les autres châteaux d'eau, l'autonomie est comparable. Pour les réservoirs, l'activation des vannes après 1 heure a fait gagner en moyenne 3h10 d'autonomie par rapport au scénario 1bis. Même si on ne peut pas parler d'infrastructure mais seulement d'équipements lorsque l'on parle des vannes, il s'avère que leur rôle est tout aussi essentiel sur ce territoire que le fonctionnement des pompes car il conditionne l'accès à la ressource en eau des réservoirs et des châteaux d'eau. Deux tables en annexe détaillent les autonomies de chaque stockage. La carte ci-dessous représente l'heure à laquelle il y a eu une vidange totale des réservoirs (attention, distinct de la durée !). La plupart retrouve de l'eau en moins d'une heure. Néanmoins, ces vidanges provoquent des ruptures d'alimentation en eau sur le territoire à différentes périodes de la journée, comme le montre la carte ci-dessous.

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

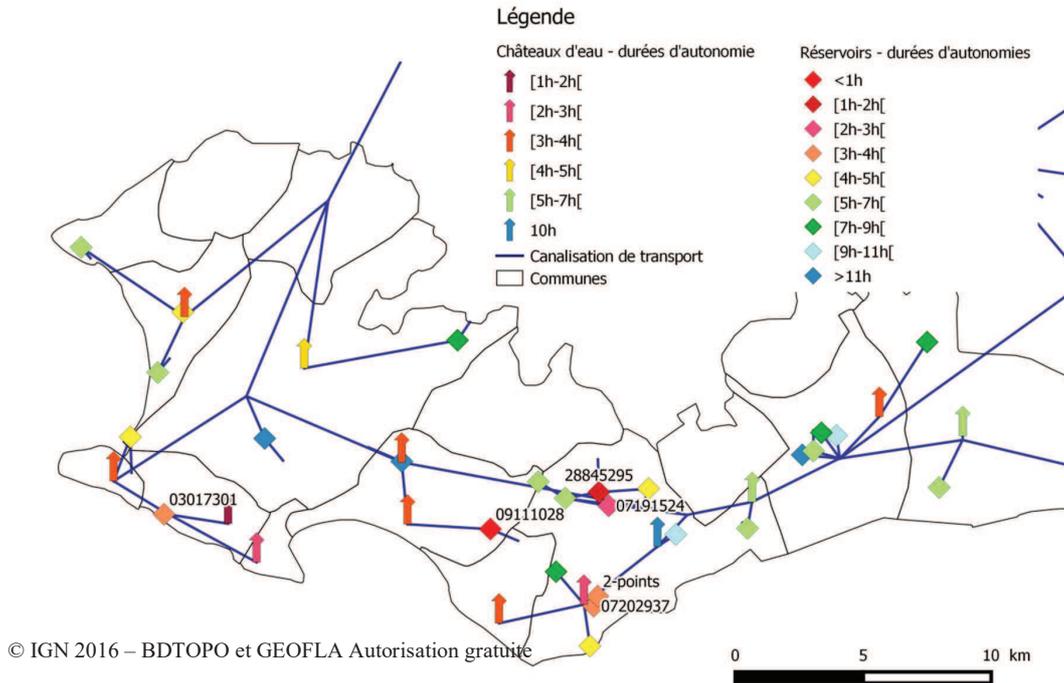


Figure 54 : Autonomie des châteaux d'eau et des réservoirs sur le scenario 1ter

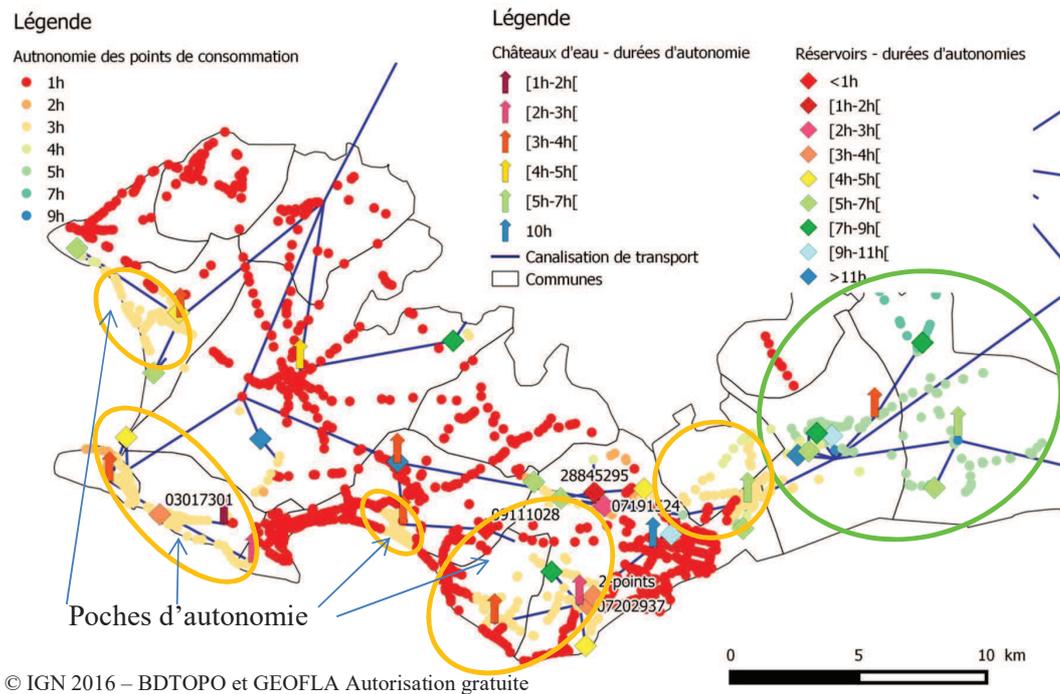


Figure 55 : Autonomie des points de consommation avant une première rupture d'alimentation en eau potable sur le scénario 1ter

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

Des poches d'autonomie de trois heures avant la perte d'alimentation en eau apparaissent dans ce scénario 1ter par rapport au scénario 1bis dans la zone ayant seulement une heure d'autonomie avant la première rupture de service. La carte précédente illustre la possibilité de constituer des zones d'impact évolutives lorsque l'on sait approximer la réaction de l'opérateur (hypothèse d'une manipulation manuelle des vannes motorisées en environ 1 heure). Dans une démarche de gestion de crise, une précision de l'ordre de l'heure n'est peut-être pas la plus adaptée car elle est très sensible aux conditions initiales, aux délais de réaction des équipes et aux moyens disponibles. En revanche, il est intéressant de communiquer aux institutions que sous 4 heures, l'ensemble des communes de l'agglomération de Saint-Nazaire seraient privées d'eau –dans le cadre de ce réseau fictif– à l'exception des deux à l'Est (Donges et Montoir de Bretagne), et que six communes ont une très faible autonomie (de l'ordre de l'heure) en eau face à une coupure de courant. Sur la coupure de courant réelle de juin 2016, qui a duré une heure, aucune coupure d'eau potable n'a été reportée dans les médias. Le réseau précédent est donc bien un réseau fictif, qui illustre seulement la faisabilité d'un calcul de zones d'impact évolutives.

Ces trois scénarios (1, 1bis et 1ter) sont partis du principe que la panne de courant n'était pas limitée en durée. Il est également intéressant de comparer les résultats de pannes de courant limitées dans le temps afin d'identifier le seuil temporel de résilience du territoire face à une coupure d'électricité. Ce point est abordé dans le paragraphe suivant.

Scénario 2 :

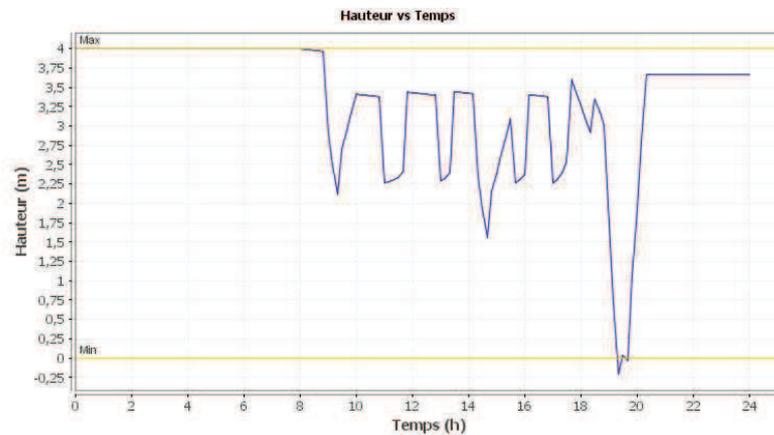
La coupure d'électricité ne dure qu'une heure entre 7h30 et 8h30. Seuls sept stockages (dont deux châteaux d'eau) sur les 45 n'ont pas assez de réserve pour résister à cette panne. Ils sont décrits ci-après. Il est à noter que cinq de ceux-ci ne sont pas vides pendant la période de coupure de courant, mais après. En effet, malgré la remise en service des vannes motorisées et des pompes, celles-ci n'arrivent pas à compenser le stock perdu pendant la coupure de courant face à la consommation de la journée. De plus, la réouverture des vannes motorisées et le démarrage des pompes provoquent des afflux par «à coups» que les systèmes d'asservissement des réservoirs ont du mal à gérer, provoquant des oscillations fortes sur les hauteurs de réservoir. Deux courbes de hauteur de réservoirs sont présentées ci-après pour illustrer ce phénomène.

Table 30 : Réservoirs R et châteaux d'eau C qui ont été vides lors du scenario 2 (1 heure de panne de courant)

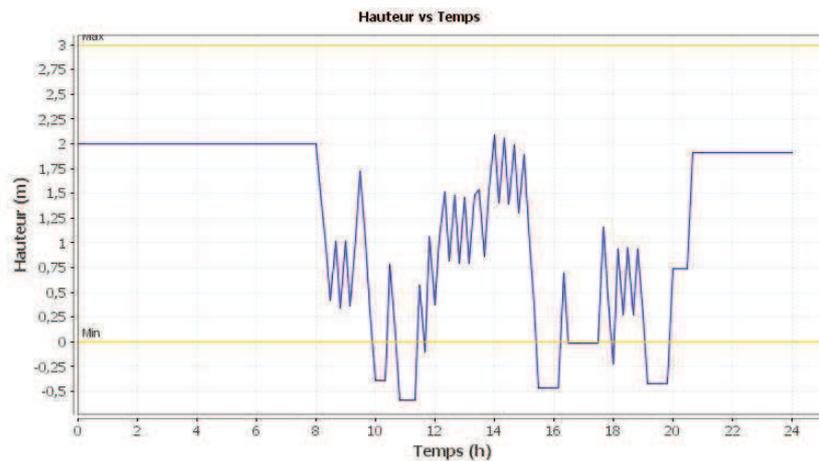
Nom	Heure de vidange totale	Autonomie en heure
R11028	08:10	0:40
C7419	08:30	1:00
R45295	08:40	1:10
RGroupe-de-4	09:30	2:00
R45289	10:00	2:30
R91524	15:20	7:50
C06606	19:20	11:50

Table 31 : Variations de hauteur d'eau dans les châteaux lors d'une panne électrique d'une heure à 7h30 (scénario 2)

C06606 vide à 19h20



R45289 vide à 10h



La carte ci-dessous représente les zones qui ont été privées d'eau et l'heure de cette coupure. On peut également y distinguer des zones d'impact évolutives. En revanche, là également, il s'agit d'une coupure brève dans le temps (moins de 2 heures). Les principaux impacts se

produisent dès la coupure d'électricité. Cependant il y a une seconde « réplique » de cette coupure d'eau vers 19h30, comme le montrent à la fois la carte ci-dessous et les courbes précédentes des hauteurs d'eau dans les réservoirs.

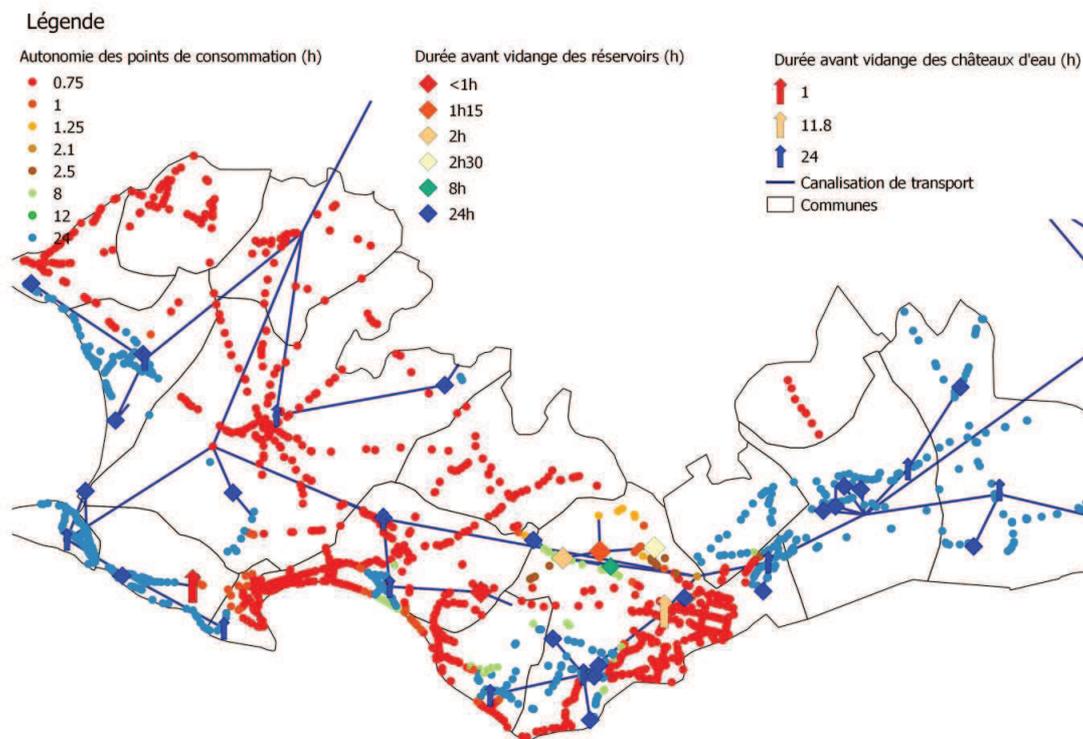


Figure 56 : Autonomie des points de consommation avant une première rupture d'alimentation en eau potable sur le scénario 2 (1 heure de coupure)

Il serait intéressant de répéter cette analyse avec des pannes de 2, 3 ou 4 heures afin de repérer le seuil de coupure électrique au-delà duquel des coupures d'eau de plus de 4 heures en continu se font sentir. Cette analyse fait partie des perspectives de la thèse. De même, le scénario 3, qui consistait à décaler ces pannes limitées d'électricité à différents moments de la journée, ne sera pas abordé ici mais pourra faire l'objet de travaux futurs.

3.5.4 Etude de faisabilité sur la généralisation de zones d'impact évolutives et perspectives d'interprétation du couplage faible par les zones d'impact évolutives

Les résultats précédents correspondent à la modélisation d'un effet cascade entre le réseau électrique et le réseau d'eau potable. Ils montrent qu'il est possible, à partir d'un simulateur spécifique, de produire des zones d'impact évolutives. Il a été cependant démontré que ces résultats sont cependant très sensibles à plusieurs éléments.

- Les éléments propres aux territoires influencent les résultats, comme par exemple la connaissance de la répartition de la consommation, la connaissance des réactions

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

typiques (mise en place de groupes électrogènes en environ 1 heure, manipulation des vannes motorisées au cas par cas, etc...) et de leurs délais.

- Les éléments relatifs au contexte comme l'heure et la durée de la panne électrique ou encore la saison vont également influencer le résultat de ces simulations d'effet cascade.

S'il est tout à fait envisageable de simuler les réactions en cascade face à un scénario d'entrée donné (étendue et durée de la panne électrique connues), la multiplication des scénarios d'entrée entraîne une croissance exponentielle des résultats à obtenir (en fonction de l'heure de la journée, de l'état des réserves au moment de la panne, etc.). Cette complexité nécessite donc de structurer ces bases de données de zones d'impact évolutives pour qu'elles soient exploitables dans le cadre d'effets cascade plus généralisés.

L'utilisation de simulateurs spécifiques nécessite une expertise sur le réseau modélisé et des données mises à jour. C'est pourquoi il est primordial de garder cette simulation aux mains des experts que sont les gestionnaires des différents réseaux. L'utilisation d'un couplage faible entre des simulateurs permet de garder les capacités de simulation chez les gestionnaires, tout en permettant d'étudier les effets cascade et les interdépendances à un niveau plus central (institutions de sécurité civile). Ce travail propose d'utiliser les zones d'impact évolutives comme lien de couplage entre les simulateurs. La simulation de l'évolution spatio-temporelle des zones privées du service modélisé (eau, électricité, gaz, etc.) est à la fois le résultat d'une simulation d'un premier réseau et le groupe de données d'entrée d'une seconde simulation pour un second réseau. La résolution successive de ces zones d'impact nécessite une hiérarchisation des études. Celle-ci est justifiée par les connaissances à l'échelle du service urbain des différences d'influence entre les opérateurs. Ainsi, la figure ci-dessous représente cette hiérarchie des influences, d'après les données produites par Toubin sur les opérateurs parisiens face à la crue centennale [Toubin, 2014], et la pyramide de résolution associée à cette analyse et à la méthodologie proposée ici. La notion d'influence correspond à la somme des relations de dépendance à un opérateur, pondérée par l'importance de celles-ci.

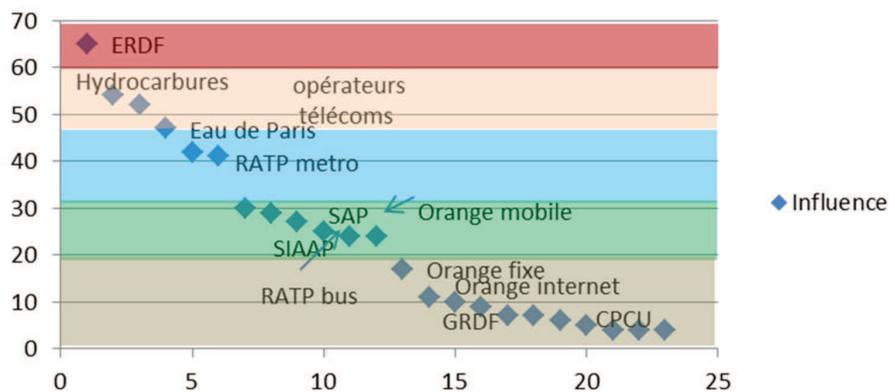


Figure 57 : Groupe d'influence des opérateurs parisiens de réseaux techniques face à la crue centennale de la Seine, sur la base des données de [Toubin, 2014]

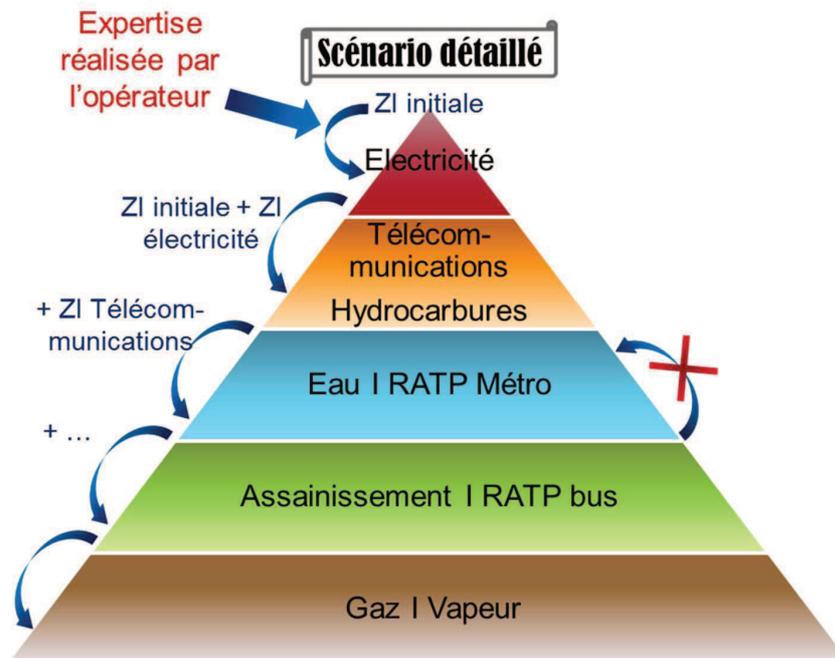


Figure 58 : Pyramide proposée pour la hiérarchisation entre opérateurs des calculs de zones d'impact pour la modélisation d'effets cascade

Cette approche respecte ainsi les contraintes pratiques relatives à la modélisation des effets cascade (diminution de la quantité de données à mettre à jour pour la Sécurité Civile, absence d'obligation d'expertise pour interpréter les résultats). Cependant, elle présente plusieurs limites. Tout d'abord, une résolution successive des effets cascade implique une impossibilité de modélisation des boucles de rétroaction (**Figure 58**). Par exemple la perturbation de service de RATP bus ne peut pas, par rétroaction, influencer la qualité de service du réseau de distribution d'eau potable. Cette limite est acceptable dans la mesure où la simulation des effets cascade est limitée à une période courte (hypothèse initiale). La seconde limite concerne la flexibilité de l'approche. En effet, en choisissant de garder l'expertise chez les opérateurs, cette approche se focalise sur une résolution centrée sur un scénario détaillé, en localisation et en intensité. Cette approche rend donc difficile l'extrapolation des résultats obtenus vers d'autres scénarios similaires mais d'intensité ou de localisation différentes. C'est pourquoi cette méthode nécessite en amont une analyse des menaces sur un territoire, et l'identification des scénarios clés à simuler (voir la section 3.1 pour le classement des scénarios).

Connaître les zones privées du premier service ne suffit pas pour identifier les conséquences sur le deuxième réseau. Il faut au préalable savoir quelles sont les infrastructures de ce second réseau qui sont exposées et vulnérables à cette coupure de service. Il faut également savoir au-delà de quel seuil un réseau n'est plus résilient (incapable de reprendre du service sans une aide extérieure). Cette analyse de vulnérabilité et de résilience est présentée dans le chapitre suivant. Connaître ces résultats permettra de restreindre le nombre de scénarios d'effets

cascade à étudier via des couplages faibles de simulateurs. Les deux approches sont donc complémentaires.

3.6 Méthode d'évaluation des conséquences sociétales immédiates et du seuil temporel d'évolution vers une crise dans le cas d'un effet cascade

Une fois que les zones d'interruption de services sont établies suite à un effet cascade, il reste à traduire celles-ci en conséquences sociétales, économiques et environnementales. En effet, c'est en fonction de la gravité de ces conséquences qu'un gestionnaire de crise adapte les ressources déployées. Quantifier les impacts en nombre de personnes touchées fait partie des objectifs prioritaires pour dimensionner la réponse. Jusqu'à présent de nombreux outils d'évaluation des conséquences basaient leur estimation sur le recensement au bâti ou à l'îlot des habitants. Or, en semaine, les citoyens actifs sont à leur travail et les étudiants à leur université, *etc.* . Certains projets, comme CIPRNet, améliorent leurs calculs en précisant que ces logements sont pleins pendant la nuit et le soir, et font disparaître statistiquement les habitants pendant les jours ouvrés. Cependant les métros, transports ou les commerces ne sont pas pris en compte dans le recensement, alors qu'ils connaissent des heures de pointe avec une concentration importante de personnes. Le projet DEMOCRITE propose une méthode de modélisation de l'évolution temporelle et spatiale de la densité humaine comme indicateur de vulnérabilité humaine. Connaître ces cartes permet en effet de mieux visualiser les enjeux en fonction des horaires et des saisons, et de comparer de façon automatique la gravité de différents scénarios de crise envisagés. Cette méthode a été développée pour DEMOCRITE, et l'auteur l'a appliquée sur un quartier du territoire BSPP possédant une forte activité tertiaire. Pour des raisons de sécurité, ni la localisation, ni l'échelle de la grille présentée ci-dessous ne seront communiquées. En revanche, le paragraphe qui suit présente de façon qualitative la méthode appliquée, les catégories de données, et les limites de validation du résultat [Grangeat, 2016,b, g].

3.6.1 Modélisation de l'évolution de la densité humaine

L'auteur a travaillé dans le cadre de DEMOCRITE sur la méthode suivante [DEMOCRITE, Sina Bony, 2016]. L'année a été séparée en quatre périodes : la semaine, le samedi, le dimanche (ou jour férié) et les vacances d'été. Les jours sont ensuite découpés en quatre tranches horaires.

- La période de commutation du matin (heure de pointe) : 7h30 – 9h30.
- La journée : 9h30 – 16h30.
- La soirée : 16h30 – 19h30.
- La nuit : 19h30 – 7h30.

Sept catégories de données géographiques et statistiques ont été récoltées. Nous expliquons dans ce paragraphe la nature de ces données et les difficultés rencontrées qui influencent la qualité de notre application. Nous avons 70 sources de données différentes : l'habitat, le tourisme (lieux touristiques et affluence), l'hébergement touristique, les transports en

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

commun, les routes, les établissements répertoriés (dont les établissements recevant du public, possédant une capacité d'accueil connue), et les entreprises. Ce travail important a mis en évidence la difficulté d'obtenir des informations homogènes. Par exemple, si le chiffre global de population moyenne en juillet-août est donné uniquement pour l'année 2005, et que le nombre de déplacements moyen par jour d'un francilien est connu uniquement en 2001 et en 2010, la méthode oblige à extrapoler pour obtenir une hypothèse du nombre de déplacements moyens par jour sur l'année 2005. Cela signifie que la mise en cohérence de la base de données s'accompagne d'un certain nombre d'hypothèses, comme par exemple celle d'une évolution linéaire entre 2001 et 2010 au lieu d'une évolution exponentielle par exemple. La difficulté est la même en fonction de l'échelle spatiale à laquelle les données sont disponibles. Avoir le taux moyen d'occupation des logements à l'échelle du département ne signifie pas que celui-ci est valable tel quel sur la localité étudiée, mais c'est pourtant l'hypothèse qui sera faite en l'absence de données plus précises. Les paragraphes ci-dessous présentent les trois catégories principales de données et leur traitement pour obtenir une base spatiale exploitable : l'habitat, les transports et la couche industrie tertiaire.

Habitat

L'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Île-de-France (IAU-RIF) a fourni la couche *Densibati 2009* dans le cadre du projet DEMOCRITE. Cette couche propose une estimation du nombre de résidents par bâtiments de la région Île-de-France (la couche de bâtiments est issue de l'IGN). Il s'agit bien d'une estimation car l'IAU a ventilé la donnée démographique disponible à l'échelle de l'IRIS (îlot de bâtiments regroupés pour l'information statistique) à l'INSEE dans les logements décrits par la couche de bâtiments de l'IGN (BD topo) pour obtenir *Densibati 2009*. L'IAU travaille actuellement sur la fourniture d'une couche de données distinguant la densité journalière et nocturne des bâtiments. En attendant celle-ci, nous proposons une méthode de répartition de la population par période de l'année, par tranche horaire, en fonction de la catégorie sociale des personnes statistiquement présentes. La méthode combine sur *Densibati 2009* :

- les statistiques départementales du taux de résidents présents pendant l'été et les week-ends, avec un taux de présence estimé à 100 % les jours ouvrés ;
- les statistiques de répartition de la population entre les enfants non scolarisés, ceux qui le sont, les étudiants, les chômeurs, les retraités et les actifs ;
- les statistiques d'activité journalière par catégorie sociale. Par exemple, une partie des actifs est estimée travailler chez elle la journée, quand la grande majorité est estimée se situer en ERP (Etablissement recevant du public) ou en entreprise.

De cette façon, la méthode recrée en statistique la diminution de la population résidente dans la journée.

Transports

Deux réseaux sont distingués : la RATP et les réseaux Transilien. Les réseaux de bus sont absorbés par la catégorie de données des routes. Aucune donnée n'a été trouvée quant à la circulation SNCF hors Transilien. La RATP a transmis le nombre annuel de personnes entrantes par station, et l'enquête globale sur les transports réalisée par l'OMNIL en 2010 a

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

fourni des statistiques de déplacements moyens par jour et par période de l'année, ainsi que des taux de fréquentation par tranche horaire. Il n'y a en revanche aucune information sur les flux sortants ni sur les correspondances. La SNCF a fourni des informations sur les flux entrants en gare journaliers sur le réseau Transilien, mais par tranches ouvertes sur les extrémités (allant de « moins de 300 », « 300-1000 »,... à « plus de 15000 »). Là encore, les flux sortants ne sont pas connus. De plus, dans les deux réseaux, la densité de personnes par wagon n'est également pas connue, de même que les fréquences de ces trains. C'est pour cette raison que la méthodologie propose d'attribuer aux stations une densité correspondant à un temps d'attente moyen d'un train, c'est-à-dire à la densité sur les quais et non en transport. Il n'est pas supposé que les personnes enlevées statistiquement de leur logement dans la journée soient les mêmes que le recensement de personnes présentes à la station de métro la plus proche. Ces données sont considérées de façon indépendante.

Entreprises

L'IAU-RIF a fourni les données géographiques sur les commerces avec leur surface de vente et le nombre d'employés. La surface de vente est ensuite multipliée par la densité de personnes autorisée dans les établissements recevant du public pour obtenir une estimation de la population maximale par commerce.

Nous avons ensuite recensé manuellement les zones présentant une activité tertiaire (immeubles de bureaux) par recherche internet pour améliorer la qualité de l'application. Il permet de ventiler les données communales sur le nombre d'emplois, dans les bâtiments connus pour abriter une activité tertiaire en fonction de leur hauteur et surface (base de données topo IGN). Cette dernière étape « artisanale » est clairement une limite de l'approche, dans la mesure où seuls les bâtiments de grande taille sont répertoriés sur internet comme possédant une activité tertiaire. On peut envisager d'améliorer cette approche avec des données de la chambre de commerce et d'industrie. L'addition de ces deux couches de données permet néanmoins de simuler le « remplissage » des locaux d'entreprises et de commerces le jour.

Autres données

Pour la route, malgré des recherches importantes et la connaissance du tracé des routes sous SIG, peu de données spatiales ont été communiquées sur le trafic à l'échelle des tronçons, et il n'est pas vraiment réaliste de dériver des statistiques régionales aux différents tronçons. Il faudrait envisager d'acheter des bases de données.

La BSPP possède les classes de capacité d'accueil des ERP car ils font partie des établissements répertoriés.

Les données sur les hébergements touristiques sont issues d'Open Street Map, ce qui signifie que cette base de données n'est pas complète, et ne prend pas non plus en compte les « meublés de tourisme » et les « résidences de tourisme ». Malgré les statistiques sur la capacité moyenne d'hébergement par type d'hébergement, il est peu évident de conclure sur la pertinence de cette application. En revanche, les données BSPP ont mis en évidence des

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

hôtels de grande capacité d'accueil, qui ont eux été implémentés dans la base de données spatiales de l'approche.

Résultats de notre application

La tranche horaire du soir (16h30-19h30) est la plus difficile à évaluer, de par la grande variabilité des activités (choix personnels de rentrer au domicile, d'aller dans des lieux de loisirs, de commerce, ou de culture) et également de par la grande variabilité des horaires de « fin de journée ». Nous montrons donc ci-dessous uniquement les couches du matin, de la journée ouvrée et de la nuit. Pour cette dernière, on retrouve la référence de la carte de recensement. La variabilité très forte autour des lieux de travail illustre la nécessité de ne pas se satisfaire d'une carte de recensement pour évaluer les impacts humains. Par ailleurs le comportement général observé sur les cartes ci-dessous est qualitativement représentatif des flux de densité auxquels on s'attend dans un quartier d'activités tertiaires.

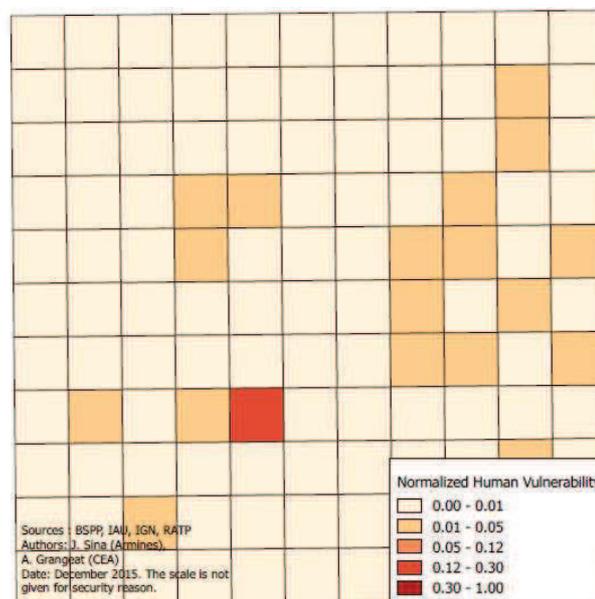


Figure 59 : Vulnérabilité humaine normalisée entre 7h30 et 9h30 un jour de semaine autour d'un quartier à activités tertiaires

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

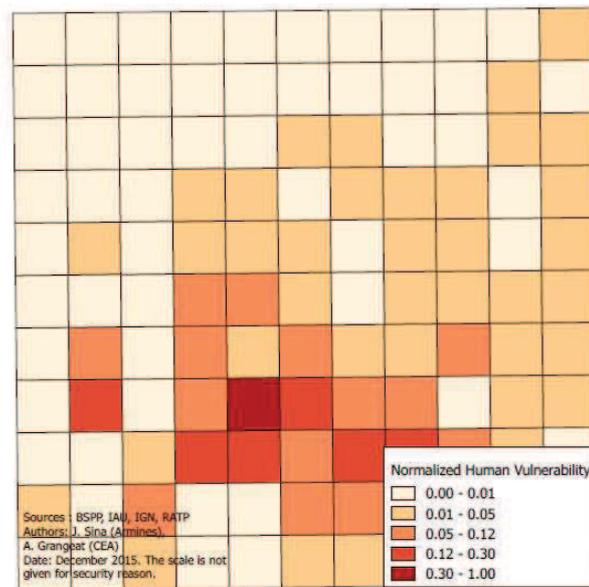


Figure 60 : Vulnérabilité humaine normalisée entre 9h30 et 16h30 un jour de semaine autour d'un quartier à activités tertiaires

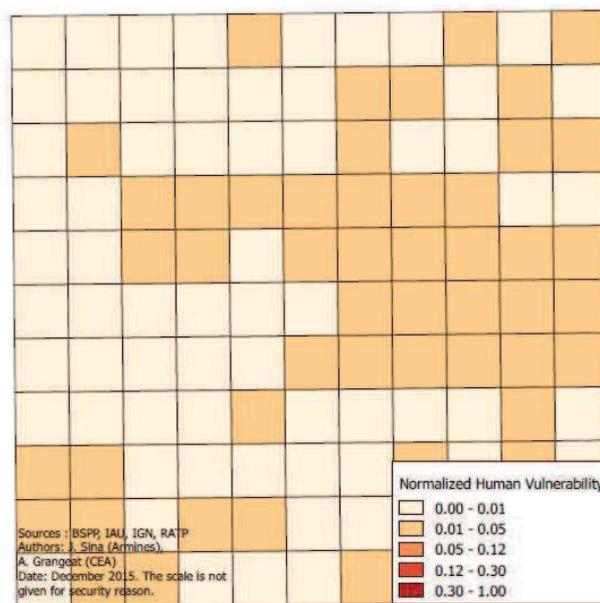


Figure 61 : Vulnérabilité humaine normalisée pendant la nuit entre deux jours de semaine

3.6.2 Discussion autour des résultats sur l'évolution de la densité humaine

La méthode précédente présente des résultats intéressants, mais c'est en partie dû à la connaissance de l'activité tertiaire sur le territoire d'application. Il reste encore des améliorations à faire avant de réaliser une application automatisée à un territoire plus large, notamment via l'acquisition de bases de données d'une qualité plus élevée. Néanmoins il est

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

possible de discuter dès à présent des perspectives d'une telle approche en planification ou gestion de crise.

En effet, la densité humaine permet de comparer les conséquences humaines de différents scénarios, et donne donc la possibilité de sélectionner de façon automatique les scénarios les plus impactants, par tranche horaire et localisation. Cette analyse, poussée à l'échelle du territoire, permet de hiérarchiser les enjeux face aux risques et donc d'analyser la «vulnérabilité humaine» du territoire. Elle permet également d'envisager une adaptation de la réponse opérationnelle face à ces scénarios.

Par ailleurs, la localisation des personnes suggère une activité, et donc une sensibilité plus ou moins importante à la rupture d'un service vital comme l'électricité, l'eau, le gaz, etc. Cependant quelques heures de coupure d'électricité ne constituent pas une crise pour la sécurité civile. Les commerces non équipés de générateurs de secours vont fermer (impossibilité de payer par carte bleue) et les clients quitter les centres commerciaux, mais si les transports fonctionnent, le scénario sera rangé seulement dans la catégorie « perturbation économique » au vu du manque à gagner et des dégradations engendrées par la situation. De même pour les immeubles de grande hauteur, une rupture d'alimentation en eau potable de quelques heures sera fortement perturbante, sans pour autant être une crise. Avoir la cartographie de la densité humaine permettrait d'estimer le nombre de personnes touchées immédiatement par une rupture de service, mais dans une situation qui n'est pas encore de l'ordre d'une « crise », et donc qui ne nécessite pas encore une gestion spécifique. La cartographie de la densité humaine a donc plutôt un intérêt pour l'évaluation des impacts directs des crises à cinétique rapide (explosion, feu, tremblement de terre).

Si les interruptions de réseaux s'inscrivent dans la durée, on observe alors une transformation progressive d'une situation perturbée vers une situation de crise. Elle s'accompagne d'une auto évacuation progressive des personnes selon leur propre tolérance à l'inconfort de la situation. Il reste alors les personnes qui ne peuvent pas se loger ailleurs, ou travailler ailleurs, et la situation évolue vers une situation de crise si leur nombre est important (mégapole, communautés de communes, etc.). Cela signifie que la cartographie de densité de population n'est plus pertinente après quelques heures de perturbation de réseaux, lorsque la situation bascule vers un état de crise. Par ailleurs, il paraît logique de supposer qu'une personne dont le lieu de travail est perturbé souhaite rentrer dans son logement. La carte de recensement fixe des logements permet donc d'estimer les personnes concernées par une défaillance à long terme de réseaux. Cependant, à la connaissance de l'auteur, il n'existe pas de délais ni de nombre seuil de victimes qui marquent le basculement d'une situation d'inconfort à une situation de crise de sécurité civile. Connaître ces délais permettrait de remonter à un indicateur précieux pour la définition de la résilience d'une société. En effet, la résilience inclut la notion de « seuil de perturbation socialement acceptable » au-dessus duquel doit se maintenir la société. Ce seuil théorique pourrait être approché quantitativement par la connaissance locale de ce délai maximal d'interruption de service, réseau par réseau, au-delà duquel la situation nécessiterait une intervention de la sécurité civile. Cette résilience est évidemment liée à la catégorie de population, les personnes vulnérables étant plus sensibles à

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

ces interruptions. Cela signifie qu'il y a également une variabilité locale de la résilience humaine.

L'évaluation de la densité humaine par tranche horaire a un intérêt fort pour l'évaluation de la vulnérabilité humaine d'un territoire, et pour la planification ou la gestion de crise à cinétique rapide. Mais ce ne sont pas les seules conséquences à évaluer. La vulnérabilité économique du territoire face aux ruptures de réseaux techniques est un autre sujet important lorsque l'on compare la gravité des scénarios. Il est tout à fait envisageable de constituer une base de données spatiales avec les différents commerces et industries, de leur attribuer un coût horaire de conséquences suite à la rupture de tel ou tel réseau, et d'en déduire un indicateur global de vulnérabilité économique en fonction des horaires. Cependant, la crise ne serait pas gérée du point de vue de la sécurité civile mais à un niveau plus politique –incluant les perspectives assurantielles–, et sort de fait du cadre de cette étude. Il est également utile de dire que ces entreprises –petites ou grandes- possèdent toutes un délai maximum d'interruption d'activité au-delà duquel l'entreprise fera faillite (notion de continuité d'activité). Ce seuil théorique de « résilience économique » pourrait être approché quantitativement par la connaissance locale de ce délai maximal d'interruption de service, réseau par réseau, au-delà duquel la situation serait qualifiée de « crise économique ».

En conclusion, on a une vulnérabilité humaine directe (donc nécessitant de prendre en compte l'évolution des densités) qui est primordiale pour les crises à cinétique rapide, puis une transition vers une crise économique (donc sociale) si la perturbation des réseaux techniques s'allonge dans le temps, avec l'importance de connaître la vulnérabilité économique en plus de la résilience humaine.

3.7 Conclusion sur les apports pour l'étude et la modélisation des effets cascade

Ce chapitre a étudié l'ensemble des aspects de la modélisation des effets cascade. La première partie propose de catégoriser les scénarios initiateurs de ces effets auxquels seront soumis les modèles des réseaux, en distinguant dans les perturbations extérieures une nouvelle cause : les agressions des réseaux techniques au niveau de leur linéaire. C'est dans ces différentes catégories que peuvent être rangés les scénarios identifiés par la sécurité civile lors de l'analyse des menaces de son territoire, afin de classer la base de zones d'impact d'effets cascade construite ci-après.

La deuxième partie a concerné l'approfondissement d'une cause initiatrice d'effets cascade. L'existence de risques professionnels liés à la présence de réseaux techniques dangereux nécessite leur coupure pour une intervention sur feu des sapeurs-pompiers. La cartographie de ces zones potentiellement initiatrices d'effets cascade est à la fois un outil d'adaptation de la réponse opérationnelle face au risque professionnel et un outil d'aide à la décision face aux risques d'effets cascade. Les sapeurs-pompiers qui possèdent cette cartographie deviennent capables d'alerter les échelons supérieurs de gestion de crise si une combinaison d'évènements constitue une situation potentielle d'effets cascade.

La troisième partie a exploré les interdépendances entre les services urbains présents à l'échelle du territoire parisien. L'analyse de la base de données orientée graphe a démontré la nécessité de modéliser les liens de dépendance à une échelle plus fine que le service urbain pour une utilisation en planification ou en gestion de crise. L'échelle de service urbain est une aide à la compréhension du territoire, mais n'est pas assez précise pour modéliser des effets cascade sur un territoire. Néanmoins, les requêtes présentées possèdent un intérêt opérationnel fort pour identifier les chaînes de défaillance s'il était possible de construire une base de données orientée graphe équivalente, mais à l'échelle de l'infrastructure.

La sécurité civile s'intéresse particulièrement à l'estimation des conséquences comme indicateur d'aide à la décision en planification et en gestion de crise. Or celle-ci est basée sur la connaissance des zones d'impact relatives au scénario étudié. Nous avons vu précédemment que construire une base de données orientée graphe à l'échelle de l'infrastructure permettait d'identifier les chaînes de défaillances des infrastructures. La quatrième partie a donc exploré la possibilité d'attribuer à chaque infrastructure de réseau technique une zone d'impact fixée par avance, afin de définir si la construction d'une base de données orientée graphe à l'échelle de l'infrastructure était pertinente pour la modélisation des conséquences des effets cascade. Il s'est avéré que cette approche n'était possible que dans peu de configurations, et principalement lorsqu'il n'y avait pas de possibilité de reconfiguration topologique du réseau suite à la défaillance de l'infrastructure. Dès lors qu'il y a une possibilité de reconfiguration, il existe une évolution spatio-temporelle des zones d'impact, qu'il faut approximer par des zones d'impact évolutives. Ces zones sont le résultat de calculs spécifiques au réseau technique considéré. Le modèle utilisé doit alors, pour pallier

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

la défaillance initiale de l'infrastructure, considérer l'ensemble des infrastructures présentes dans le réseau qui participent à sa reconfiguration. L'utilisation d'une base de données orientée graphe n'est donc pas adaptée à la modélisation des effets cascade. Il est important de souligner ici que l'utilisation de simulateurs spécifiques nécessite une expertise et une mise à jour des données. C'est pourquoi il paraît plus réaliste de s'appuyer sur des compétences entretenues au sein des entreprises gestionnaires de réseaux, et non pas d'exporter ces capacités dans un organisme tiers.

Ainsi, pour obtenir un effet cascade à proprement parler, la cinquième partie propose une méthode originale qui respecte les remarques précédentes. Elle analyse successivement les impacts pour chaque opérateur. Elle propose d'utiliser les zones d'impact produites réseau par réseau et scénario par scénario comme lien de couplage faible entre simulateurs. Par exemple sur un scénario de coupure volontaire du réseau électrique (acte malveillant), la première catégorie de zones d'impact concerne les zones privées d'électricité. L'évolution de ces zones privées d'électricité correspond au scénario d'entrée impactant pour les autres réseaux techniques, comme le réseau d'eau par exemple. Puis l'utilisation d'un modèle hydraulique permet d'obtenir les zones d'impact évolutive privées d'eau par effet cascade. On parle de couplage faible car aucune boucle de rétroaction n'est considérée. Cette possibilité a été démontrée sur le scénario de coupure d'électricité volontaire dans la région de Saint-Nazaire, à l'aide d'un réseau d'eau réaliste mais supposé sur le territoire, et d'une zone de coupure d'électricité réelle. On peut alors généraliser l'approche aux autres réseaux techniques. Cette généralisation nécessite de hiérarchiser les résolutions successives, comme l'a discuté ce travail de thèse. Avec une banque de données des zones d'impact indirect par réseau technique et par scénario, il devient alors possible d'analyser les cohérences des plans de réaction vis-à-vis des services disponibles restants et de constituer des scénarios d'entraînements (aide à la planification).

Cette partie souligne également la limite de l'approche : la multiplication exponentielle de scénarios à considérer si l'on s'intéresse à la défaillance simultanée de plusieurs infrastructures indépendamment de leur cause de défaillance. Il paraît peu réaliste que l'entretien d'une base de données de l'ensemble de ces scénarios, aussi complète soit-elle, soit vraiment un outil utilisé en gestion de crise. C'est pourquoi, malgré la faisabilité de celle-ci, il est plus pertinent de sélectionner les scénarios à étudier sur la base de l'analyse de la menace en amont d'une modélisation d'effets cascade.

Dès lors qu'il y a des zones d'impact privées de services, il devient possible de quantifier les conséquences d'un scénario. La localisation des enjeux sociétaux est connue (institutions, hôpitaux, écoles, etc.). L'enjeu humain est, en revanche, plus difficile à quantifier car il existe des variations de densité dans la journée. Cette partie propose donc une méthode d'estimation du nombre de personnes immédiatement impactées par une coupure de réseau technique. C'est sur la base des conséquences que la sécurité civile peut hiérarchiser la gravité des différents scénarios répertoriés dans l'analyse de la menace. Cette dernière partie permet donc de compléter l'analyse du scénario par une analyse de la gravité.

Chapitre 3 : Contribution à l'étude des effets cascade et à leur modélisation pour la sécurité civile

Ce chapitre a ainsi couvert de nombreux aspects autour de la modélisation des effets cascade : classement des causes initiatrices, approfondissement d'une cause, méthode innovante de couplage faible pour modéliser les effets cascade, application au territoire de Saint-Nazaire sur l'impact d'une coupure de courant sur un réseau d'eau fictif mais réaliste, et enfin évaluation des conséquences d'une coupure de service en tenant compte de la mobilité humaine. Chaque aspect a été travaillé dans la perspective de fournir des indicateurs utiles à la sécurité civile tant dans les phases de planification que de gestion de crise.

La méthode de modélisation des effets cascade s'appuie sur les compétences de simulation des gestionnaires de réseaux. Face aux différents scénarios, les experts de chaque réseau technique savent transcrire le scénario d'entrée en termes de défaillances effectives sur leur réseau. Ils peuvent donc produire les zones d'impact nécessaires à l'étude. En revanche, la seule communication de ces zones d'impact à la sécurité civile cache une partie des informations nécessaires à la connaissance et à la compréhension du territoire d'intervention. Il manque les points vulnérables des réseaux et leur capacité de résilience face aux différents scénarios, évalués sur la base d'une méthodologie commune. Cette méthode correspond également à un besoin des opérateurs pour le suivi de leur réseau et l'identification des axes d'amélioration de celui-ci face aux scénarios de crise. Cette méthodologie et son application sont présentées dans le chapitre 4.

4 Vulnérabilité et résilience des réseaux techniques à destination des opérateurs

Le chapitre précédent s'appuie sur les capacités de simulation des opérateurs pour modéliser des effets cascade entre réseaux techniques face à des scénarios donnés. Nous avons vu que la sécurité civile a un intérêt fort à regrouper toutes ces zones d'impact dans un outil permettant d'améliorer sa planification et sa gestion de crise. Ce regroupement d'informations dans une institution neutre en termes de concurrence peut également constituer une aide précieuse pour la planification des opérateurs dans leur gestion de crise. Cela leur permet d'estimer, par scénario, les interruptions de services concomitantes avec lesquelles ils devront composer pour leur propre gestion de crise. Ils sont alors en position de mieux évaluer leur vulnérabilité et leur résilience, non pas seulement face aux impacts directs, mais aussi face aux effets cascade indirects qui pourraient résulter du scénario initial.

Ce chapitre s'intéresse à l'évaluation des capacités de résilience des réseaux techniques comme systèmes sociotechniques, face à un scénario détaillé. Il peut également être vu comme une façon de hiérarchiser les scénarios face auxquels il est utile d'augmenter sa résilience ou de diminuer ses vulnérabilités, et une façon d'identifier les axes d'amélioration du système. Il est important que les deux notions de vulnérabilité et de résilience se mesurent de façon homogène, quel que soit le réseau technique considéré ou le scénario étudié, pour que ces notions gardent un sens commun. C'est pourquoi la section suivante propose une méthode transposable à plusieurs réseaux et plusieurs scénarios, basée sur les capacités des réseaux à assurer les exigences réglementaires et contractuelles liées au service fourni. En revanche, il n'est pas pertinent de se servir de cette méthode d'évaluation comme d'un outil de comparaison entre les réseaux. En effet les territoires, contraintes et menaces sont extrêmement variables et cela n'aurait pas de sens de décréter un réseau meilleur qu'un autre si la localisation ou le contrat de service diffère.

Le projet franco-allemand RESIWATER a identifié un besoin clair de créer une méthodologie d'évaluation de la résilience et de la vulnérabilité des opérateurs de réseaux d'eau face à différents scénarios. C'est dans le cadre de ce projet que l'auteur de la thèse a créé cette méthode (§4.1), et l'a faite appliquer aux gestionnaires de réseaux d'eau Véolia Île-de-France, Strasbourg Euro-métropole et Berlin Wasser Betriebe (§4.2). La section 4.3 étudie la faisabilité de l'application de cette méthode à d'autres réseaux techniques. La dernière partie abordera également les avantages et limites de cette méthode.

4.1 La méthode d'évaluation de la vulnérabilité et de la résilience développée pour les réseaux d'eau

4.1.1 Concepts généraux

La méthode créée a comme contrainte d'évaluer la vulnérabilité et la résilience face à des scénarios détaillés (instances de scénarios appelées vignettes), identifiés par les opérateurs de réseaux d'eau (contexte du projet RESIWATER). Cette approche ne doit donc pas être interprétée comme une analyse globale de vulnérabilité et de résilience détachée d'un scénario

de crise. Des lors que les scénarios sont détaillés, cela signifie que l'exposition est une notion déterministe dans cette méthode : les infrastructures sont exposées ou non au scénario détaillé (emprise de l'inondation, acte de malveillance localisé, etc.). Pour rappel du chapitre 2, les notions de vulnérabilité et de résilience sont définies comme deux notions complémentaires. La vulnérabilité est une mesure de l'évolution passive du système technique, et correspond à la perte de service mesurée suite aux dommages physiques et fonctionnels des infrastructures. La résilience est vue, elle, comme la réaction active du système face à sa vulnérabilité.

Un réseau technique peut être décomposé de façon simplifiée en une partie technique et une couche organisationnelle de gestion du réseau (**Figure 62**). Les consommateurs, les ressources et l'environnement de ses infrastructures constituent l'extérieur du système.

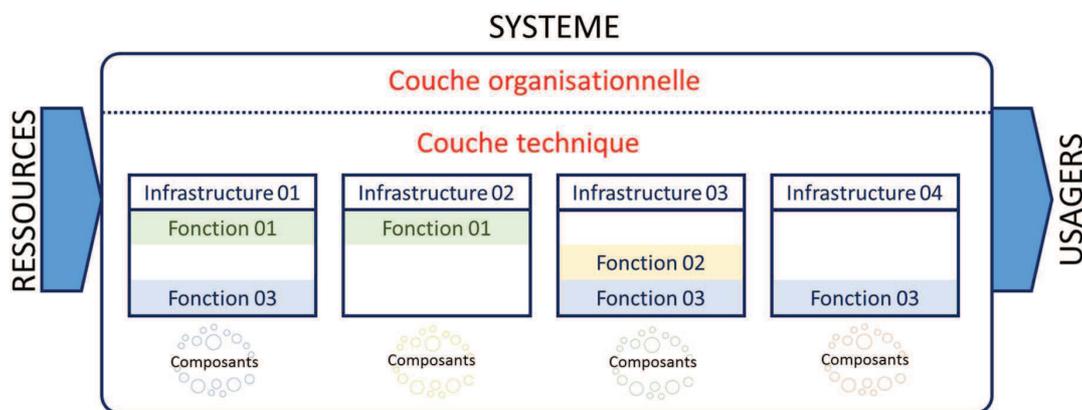


Figure 62 : Découpe simplifiée du système sociotechnique

Les infrastructures correspondent à des installations qui remplissent au moins une fonction (produire, distribuer, stocker, etc.). Il peut exister plusieurs instances d'infrastructure par fonction (**Figure 62**). De même une installation peut assurer plusieurs fonctions. Cette installation peut être elle-même décomposée en composants, mais cette échelle d'analyse n'est pas explicitement utilisée.

Nous avons choisi de définir trois états du système, en se basant sur les exigences réglementaires et contractuelles des réseaux en termes de service (qualité et quantité).

- Normal, où le niveau de performance P est au-dessus du seuil contractuel P_{normal} , et qui correspond à la capacité de gestion des incidents quotidiens du réseau
- Dégradé, où le niveau de service est en-dessous du seuil contractuel P_{normal} , mais le service n'est pas encore considéré comme défaillant à $P_{\text{défaillant}}$, c'est-à-dire que les capacités du système ne sont pas encore dépassées et qu'il n'est pas encore nécessaire de déclencher des plans d'urgence nécessitant une intervention d'un organisme extérieur.
- Défaillant, où le niveau de service est inférieur à $P_{\text{défaillant}}$ et où les plans d'urgence ont été enclenchés, nécessitant l'aide d'une institution extérieure (crise).

Un niveau de performance peut être évalué par la pression, le débit, la qualité de l'eau (concentration de polluants) pour un réseau d'eau. Un niveau de performance évolue en fonction du temps et des décisions prises.

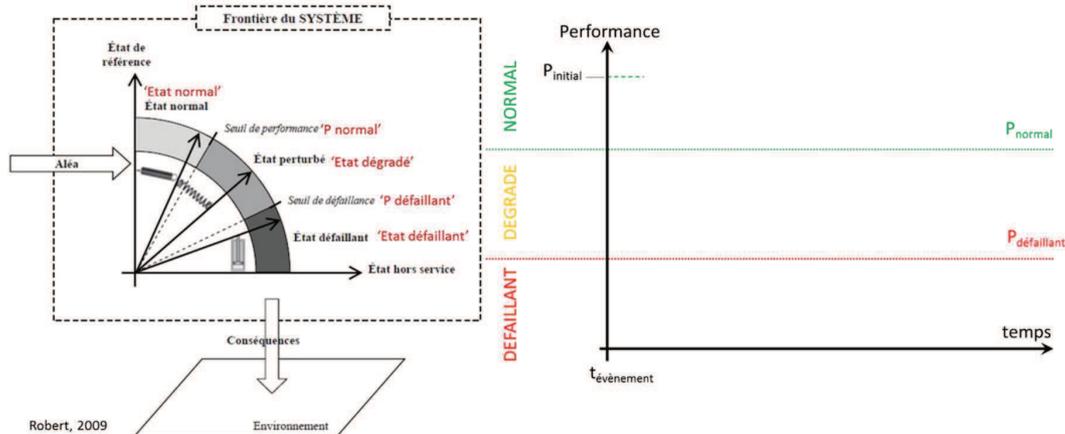


Figure 63 : Les phases d'évolution du système. Gauche : Description d'après [Robert, 2010] et droite : vue du graphique performance/temps

Pour l'analyse de vulnérabilité, le réseau d'eau sera étudié dans une approche inductive (bottom-up) à deux échelles : celles des infrastructures, puis celle du système technique en entier. On applique tout d'abord à chaque infrastructure une analyse systémique. En effet une infrastructure a une réalité matérielle et des rôles fonctionnels à remplir (services). Elle utilise pour cela des ressources support comme l'électricité ou les télécommunications. Deux types de vulnérabilité seront considérés pour les infrastructures : une vulnérabilité physique directe des infrastructures exposées à la menace, et une vulnérabilité fonctionnelle qui correspond à la perte de ressource support (électricité ou télécommunication) par effet cascade du scénario initial. Le résultat de cette première approche sera une liste d'infrastructures défaillantes. Puis, à l'échelle du système, on calcule une vulnérabilité globale sur la base de la modélisation hydraulique du fonctionnement du réseau (en qualité et quantité d'eau) compte-tenu de la liste des infrastructures défaillantes. La vulnérabilité globale correspond à la défaillance du service (quantité ou qualité) en un point du réseau à la fin de la phase passive d'évolution du système (qui est aussi le début de la réaction du système). C'est-à-dire qu'elle mesure la capacité du système à éviter cette situation de vulnérabilité, soit en ayant des infrastructures moins vulnérables (physiquement ou fonctionnellement), soit en ayant une structure topologique capable d'absorber de façon passive la défaillance des infrastructures listées précédemment, soit en réagissant plus vite et en entrant plus rapidement dans la phase de réaction pour empêcher une défaillance de service. Pour chaque évènement initiateur étudié (vignette), on mesure la vulnérabilité du système sur une échelle allant de 1 à 3, 1 correspondant à une faible vulnérabilité et 3 à un système très vulnérable. Enfin, il faut ajouter à cela une vulnérabilité externe au système, qui correspond à la quantification des conséquences de l'interruption de service. Celle-ci n'est pas détaillée ici car elle renvoie à l'évaluation des conséquences d'une rupture de service, point abordé dans le chapitre 3.

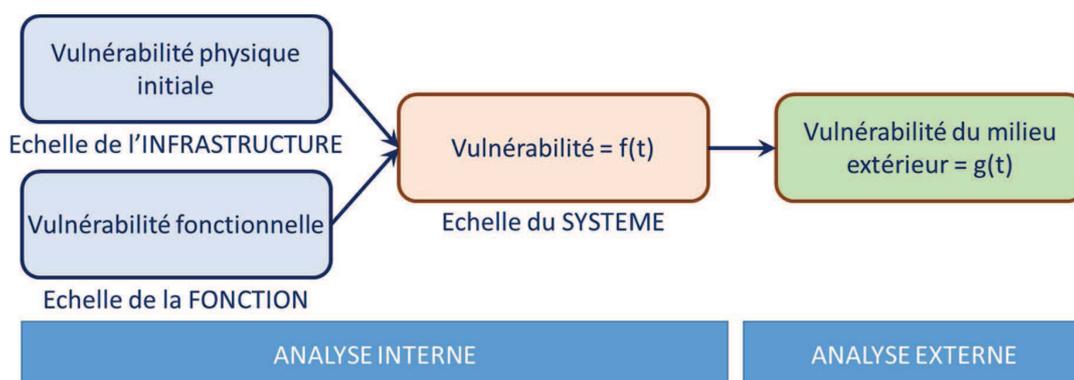


Figure 64 : Enchaînement des vulnérabilités et échelles d'analyse

La résilience, phase active de réponse du système, est analysée sur la base des trois capacités retenues dans le chapitre 2 : la capacité d'absorption, la capacité d'adaptation, et la capacité de réparation. Comme expliqué précédemment, la capacité d'absorption correspond à l'opposé de la vulnérabilité globale. La capacité d'adaptation correspond à la réponse mise en place dans l'urgence pour empêcher ou limiter la détérioration du service en qualité et en quantité. Elle correspond à la préparation de l'organisation, mais aussi à la disponibilité des ressources nécessaires à la réaction et également à sa rapidité de détection du problème et de mise en place des mesures. En effet, c'est bien quand ces mesures sont mises en place et qu'elles commencent à être effectives que l'évolution du système arrête d'être passive et devient influencée par la réaction du système. Un quatrième aspect correspond à l'efficacité des mesures d'urgence (palliatives). Il s'agit de ramener dans un temps acceptable un service de distribution à un niveau dégradé mais non défaillant. Enfin la capacité de réparation correspond à la capacité au long terme de se remettre du scénario initial dans un délai et un coût acceptables avec une performance de service au moins aussi grande que celle initialement atteinte. Il est important de souligner qu'il existe deux façons de mesurer la résilience : *a priori*, en estimant la capacité de réaction du système, et *a posteriori*, en mesurant sur une courbe de performance constatée l'évolution du système. La méthode propose d'évaluer les deux aspects. Pour chaque capacité de résilience, la méthode propose un classement allant de 1 à 3, avec 1 une très faible résilience et 3 une bonne capacité de résilience.

Les concepts précédents ont été expliqués de façon générale. Il s'agit maintenant de les illustrer sur un cas simple, afin d'introduire le questionnaire qui permettra aux opérateurs d'appliquer cette méthodologie d'évaluation. L'application de cette méthode sur le réseau d'eau fictif de Saint-Nazaire (section 3.5) est présentée en Annexe 6.

4.1.2 Illustration de la méthode

Le réseau d'eau présenté dans ce paragraphe sert d'illustration pour l'application de la méthode. Il est plus simple que le réseau utilisé dans la section 3.5 de ce travail, et permet de mieux appréhender les concepts présentés. Il est composé d'une station de pompage I1, d'une usine de potabilisation I2 qui inclut une salle de commande du réseau, une salle de commande de secours du réseau I3, qui fait la redondance avec la salle I2, et un château d'eau I4. Afin de

simplifier le modèle, aucune mention des canalisations n'est faite, et l'on suppose que les consommateurs sont alimentés en priorité par la station de potabilisation et par le château d'eau en cas de nécessité. Le système de contrôle est programmé pour ouvrir les vannes de sortie du château d'eau en cas d'arrêt de la production d'eau par I2.

Le système comporte quatre fonctions : pomper, traiter, contrôler et stocker. Elles sont représentées sur la figure ci-dessous. Nous envisageons comme scénario une inondation par débordement de rivière dont l'étendue est schématiquement représentée sur la **Figure 65**.

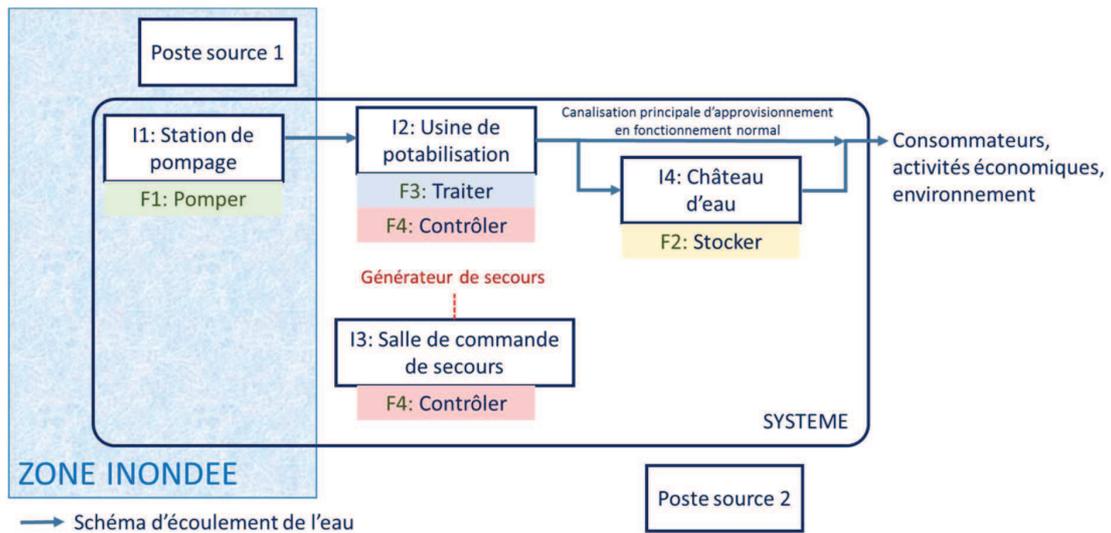


Figure 65 : Carte du système d'illustration

La Figure 65 représente les infrastructures physiquement exposées à l'inondation. Pour connaître les infrastructures fonctionnellement impactées suite à l'inondation, il faut représenter les liens de dépendance fonctionnels de ces infrastructures (**Figure 66** et **Figure 67**). Ici la fonction F4 Contrôler est redondante, ce qui veut dire qu'à la fois I2 et I3 peuvent l'assurer. A la fois I1, I2 et I3 sont électro-dépendantes du poste source 1 et I4 est dépendante du poste source 2. Pour les besoins de la vignette (une instance du scénario inondation), nous considérons que le poste source 1 est en zone inondée. La salle de commande de secours I3 est la seule à posséder un générateur de secours. Au moment de l'inondation, le château d'eau est supposé plein.

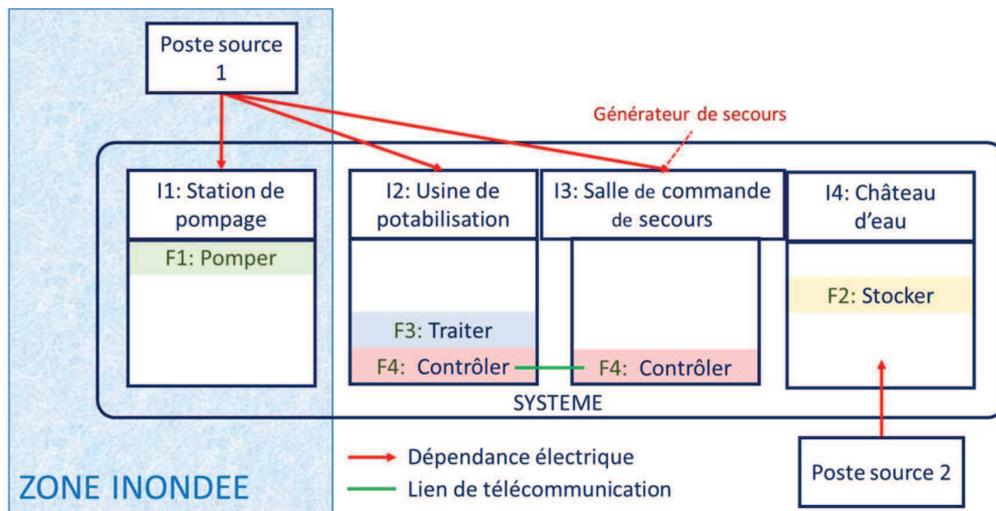


Figure 66 : Cartographie des liens fonctionnels

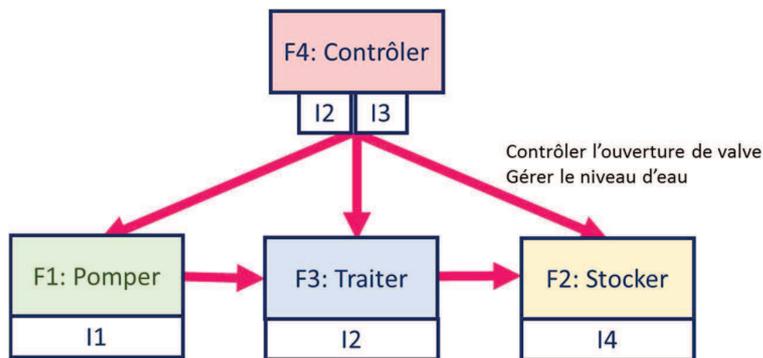


Figure 67 : Synthèse des liens fonctionnels

4.1.3 Analyse de la vulnérabilité sur le système d'illustration

4.1.3.1 Evaluation de la vulnérabilité physique des infrastructures

Trois niveaux de dégradation (note et code couleur) sont possibles pour chaque infrastructure : aucune dégradation ($V_{\text{infrastructure}} = 1$), une dégradation partielle ($V_{\text{infrastructure}} = 2$) et une destruction totale ($V_{\text{infrastructure}} = 3$). L'ensemble des notes de dégradation compose la signature des vulnérabilités physiques des infrastructures face à la vignette. Afin de pouvoir comparer les différents scénarios entre eux pour un même réseau, il s'est avéré intéressant de créer un indicateur global de la vulnérabilité physique des infrastructures, basé sur le pourcentage d'infrastructures dégradées par le scénario. Nous avons donc proposé une échelle de trois niveaux avec des seuils de dégradation :

- Très peu d'infrastructures sont endommagées (par exemple moins de 10 %) et $V_{\text{physique, système}} = 1$,
- Plusieurs infrastructures sont endommagées (par exemple entre 10 % et 40 %) et $V_{\text{physique, système}} = 2$,
- De nombreuses infrastructures sont endommagées (plus de 40 %) et $V_{\text{physique, système}} = 3$.

Chapitre 4 : Vulnérabilité et résilience des réseaux techniques à destination des opérateurs

Les seuils sont donnés à titre indicatif et doivent être adaptés au contexte du réseau. Lors de son application, certains opérateurs de réseau d'eau ont souhaité pondérer cet indicateur global par l'importance relative des infrastructures de leur réseau et il est tout à fait envisageable de faire évoluer l'indicateur dans cette direction.

Application au système d'illustration

Nous supposons pour les besoins de l'exemple que la seule infrastructure exposée du réseau, I1, est également vulnérable à l'inondation (aucun batardeau mis en place par exemple). On obtient alors une signature des vulnérabilités physiques des infrastructures égale à I1 I2 I3 I4 et un indicateur global égal à $V_{\text{physique, système}} = 2$.

4.1.3.2 Evaluation de la vulnérabilité fonctionnelle des infrastructures

Dans cette phase, on s'intéresse à l'état fonctionnel des infrastructures et non à leur état physique. Pour chaque infrastructure hébergeant une fonction, on vérifie si cette infrastructure est dégradée physiquement (paragraphe précédent) et si cela l'empêche d'assurer la fonction étudiée, ou si elle est vulnérable à la rupture de service support constatée (effet cascade). Pour la rupture de service support (deuxième cas), on définit de nouveau trois échelles d'analyse par fonction de l'infrastructure :

- La fonction est intègre sur cette infrastructure $V_{\text{ressource, fonctionnelle}} = 1$
- La fonction est partiellement dégradée $V_{\text{ressource, fonctionnelle}} = 2$
- La fonction n'est plus disponible sur cette infrastructure $V_{\text{ressource, fonctionnelle}} = 3$

Puis on regarde par infrastructure si l'outil assurant la fonction est opérationnel (endommagement) et si la ressource nécessaire est disponible en utilisant l'opérateur minimum :

$$V_{\text{infrastructure}} = \text{Min}(V_{\text{ressource, fonctionnelle}} ; V_{\text{physique}})$$

Cette décomposition en rupture de fonction, soit par dégâts matériels, soit par rupture de ressource support, ne paraît pas instinctive au premier abord. Cependant, elle permet d'envisager dans une phase ultérieure une automatisation de ce calcul de vulnérabilité de chaque infrastructure face aux bases de données des scénarios. On obtient alors la liste des infrastructures défailtantes par impact direct ou indirect (effet cascade), dont il faut tenir compte avant de lancer une simulation du réseau hydraulique.

Pour obtenir un indicateur plus global de la vulnérabilité fonctionnelle, afin de synthétiser les impacts, il faut considérer, par fonction générique (F1, ... F4) à l'échelle du système, si :

- la fonction est toujours disponible $V(F_i)_{\text{fonctionnelle}} = 1$;
- la fonction est partiellement disponible $V(F_i)_{\text{fonctionnelle}} = 2$;
- la fonction est indisponible $V(F_i)_{\text{fonctionnelle}} = 3$;

On obtient alors la signature de l'indisponibilité des fonctions. Dès lors qu'une des fonctions est indisponible, on a une vulnérabilité forte du système. Nous proposons d'utiliser l'opérateur maximum pour informer de façon générale sur l'état fonctionnel du système.

$$V_{\text{système, fonctionnelle}} = \text{Max}(V(F_i)_{\text{fonctionnelle}})$$

Application au système d'illustration

Au niveau des infrastructures : La fonction F1 « Pomper » abritée par l'infrastructure I1 est totalement indisponible à cause de sa rupture d'électricité, tout comme les fonctions F3 « Traiter » et F4 « Contrôler » de I2. La fonction F4 de I3 est partiellement perdue car elle repose sur l'utilisation de ressources alternatives. Seule la fonction F2 « Stocker » de I4 est préservée à son niveau initial.

Au niveau des catégories de fonction : Les fonctions F1 et F3 sont totalement perdues, F2 est toujours disponible, et F4 est partiellement perdue. On obtient donc la signature suivante :

F1 F2 F3 F4

Au niveau de la vulnérabilité fonctionnelle du système : Plusieurs des fonctions du système sont perdues totalement. On a donc $V_{\text{système, fonctionnelle}} = 3$.

4.1.3.3 Méthode d'évaluation de la vulnérabilité d'un système

La vulnérabilité du système s'appuie sur l'identification précédente des infrastructures défaillantes, et non pas sur les indicateurs globaux qui sont faits uniquement pour la représentation des conséquences. Les gestionnaires de réseaux peuvent alors lancer une simulation hydraulique (évolution de la concentration de polluant ou variation débit/pression) sur leur réseau compte-tenu des infrastructures indisponibles. Comme expliqué précédemment, la vulnérabilité correspond à une perte de performance par rapport au niveau initial (avant évènement). C'est-à-dire que la perte de performance évolue en fonction du temps pendant la phase passive du système impacté (**Figure 68**).

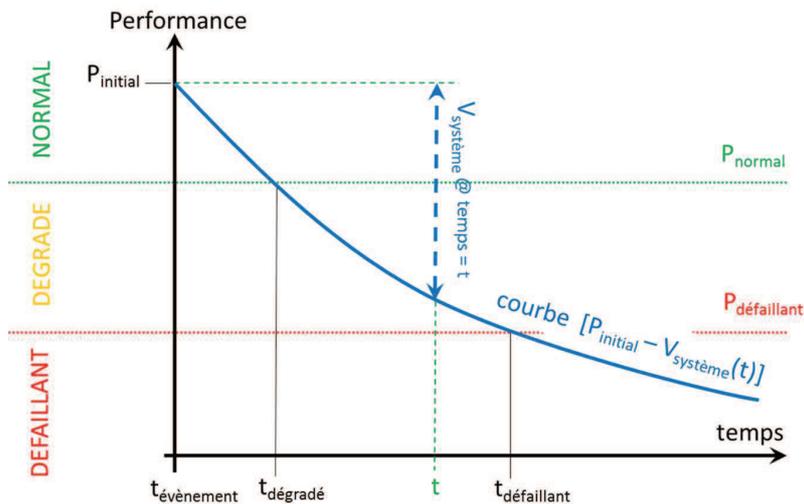


Figure 68 : Evolution temporelle de la vulnérabilité sur la courbe de performance du système

Nous avons défini la vulnérabilité du système comme la perte de performance à la fin de la réaction passive du système. Le paragraphe suivant sur la résilience permet de mesurer/d'estimer la durée de cette phase. Si l'on appelle t_1 cet instant, nous proposons là aussi une

Chapitre 4 : Vulnérabilité et résilience des réseaux techniques à destination des opérateurs

échelle à trois niveaux en fonction de l'indicateur de performance évalué (disponibilité ou qualité).

Si la performance observée est la perte de pression, nous considérons comme un état normal si à t1, l'ensemble des abonnés ont de l'eau à une pression (performance) supérieure à celle contractuelle P_{normal} (généralement 2 bar). On a alors $V_{\text{système, pression}}=1$. Un état dégradé serait d'avoir à t1 une pression inférieure à celle contractuelle en de nombreux points du réseau, mais supérieure à $P_{\text{défaillant}}$. On a alors $V_{\text{système, pression}}=2$. Nous définissons $P_{\text{défaillant}}$ comme la pression en au moins un point critique du réseau qui déclenche chez l'opérateur une cellule de crise et nécessite de coordonner ses actions avec des institutions extérieures. Le système est alors défaillant et $V_{\text{système, pression}}=3$.

Pour l'indicateur de performance « qualité de l'eau », nous définissons un système normal comme un système distribuant de l'eau potable à l'ensemble des abonnés $V_{\text{système, qualité}}=1$. Si une pollution est constatée à t1 mais contenue dans une partie du réseau et qu'aucun consommateur n'est susceptible d'être contaminé, on a $V_{\text{système, qualité}}=2$. Si la présence d'une concentration suffisante de polluant pour contaminer quelqu'un a été détecté à t1 à un robinet de consommation, alors le système est défaillant et $V_{\text{système, qualité}}=3$.

Si le scénario d'étude concerne à la fois l'indicateur de performance « pression » et « qualité », alors nous définissons :

$$V_{\text{système}} = \text{Max}(V_{\text{système, qualité}} ; V_{\text{système, pression}})$$

Application au système d'illustration

Nous rappelons tout d'abord les signatures obtenues précédemment pour la vulnérabilité physique et fonctionnelle : (I1 I2 I3 I4 ; F1 F2 F3 F4). La figure ci-dessous illustre les infrastructures défaillantes soit par fonction soit par dégâts matériels.

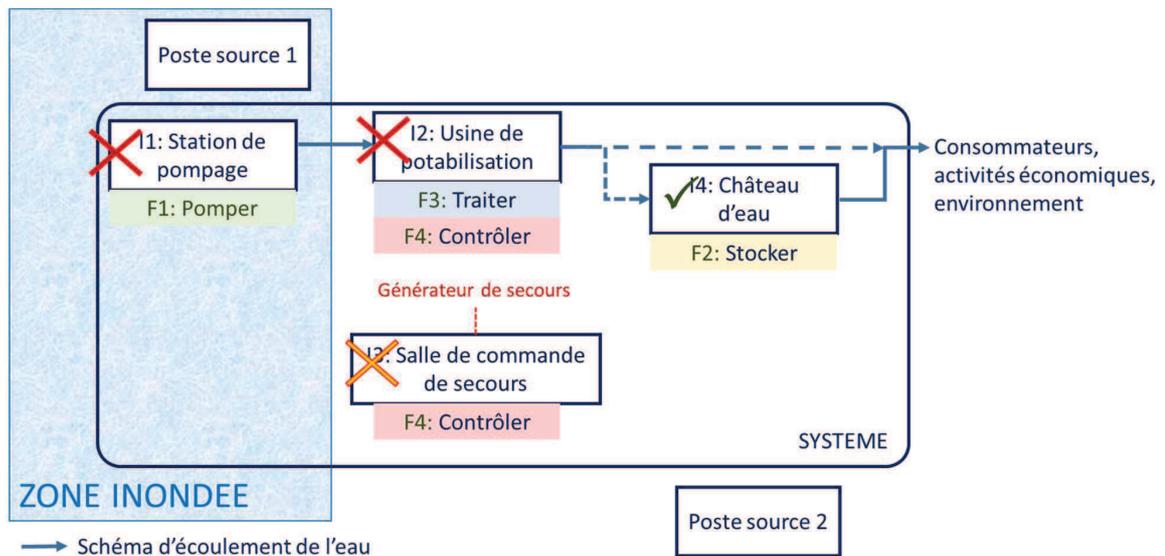


Figure 69 : Nouveau système, après avoir listé les infrastructures défaillantes par impact direct ou rupture de service support

La défaillance de l'usine de potabilisation va stopper la production d'eau potable et sa distribution directe. Mais le stockage peut maintenir une distribution d'eau de qualité pendant un temps limité. Il n'y a donc pas d'impact immédiat sur la qualité de l'eau pour le consommateur : $V_{\text{système, qualité}}=1$. En revanche la durée de résistance du système en pression dépend du volume de stockage et de la consommation. Pour les besoins de l'exercice, nous faisons l'hypothèse que l'inondation (depuis le début de la crue jusqu'à la fin de la période d'étalement) dure environ 3 jours, et que le stock d'eau correspond à environ une journée de consommation. Sur ce système très simple, il n'y a pas de possibilité de reconfiguration et le système ne peut pas « réagir » à proprement parler sur son réseau. On a donc un état défaillant après 1 jour, et à t_1 , on a $V_{\text{système, pression}}=3$. La signature de la vulnérabilité du système sur cette vignette est donc $(V_{\text{système, qualité}}=1 ; V_{\text{système, pression}}=3)$, et on a une vulnérabilité du système égale au maximum de la vignette soit $V_{\text{système}}=3$.

Evaluation de la vulnérabilité externe du système d'illustration

Elle correspond à l'évaluation des conséquences de la défaillance du système. Sur le scénario d'inondation étudié sur le système d'illustration, cela correspondrait à une coupure d'eau courante d'au moins 2 jours. Comme le système extérieur n'a pas été décrit sur cet exemple simple, l'auteur renvoie vers l'analyse des conséquences présentées au chapitre 3.

Conclusion sur l'analyse de vulnérabilité du système d'illustration

Sur ce schéma et cette vignette (instance du scénario inondation) très simples, on peut déjà tirer plusieurs conclusions sur les axes de diminution de la vulnérabilité. La séparation entre l'analyse des impacts directs physiques et indirects (rupture de support) permet de mettre en lumière l'importance de considérer les deux aspects. Par exemple, lorsque cette signature (I1 I2 I3 I4 ; F1 F2 F3 F4) est présente, on peut être tenté de mettre un groupe électrogène pour

assurer les fonctions F1 et F3 et réduire la vulnérabilité fonctionnelle. Or F1 est hébergée par I1, endommagée matériellement par ailleurs comme le montre la signature. Proposer un groupe électrogène pour la fonction F3 hébergée par une infrastructure non endommagée est un moyen classique pour diminuer la vulnérabilité fonctionnelle locale face à ce scénario de coupure électrique. Mais la méthode présentée ici permet d'aller plus loin dans l'analyse. En effet, la vulnérabilité globale (simulation hydraulique de l'ensemble du réseau) aurait montré qu'assurer la fonction de « traitement » par groupe électrogène sans avoir accès à la fonction « pomper » (endommagement de I1) n'aurait pas diminué la vulnérabilité du système car la ressource reste indisponible. Diminuer la vulnérabilité de ce système face à cette vignette (rappel : instance du scénario inondation) passerait alors par une augmentation du volume de stockage pour avoir une autonomie d'eau supérieure à la durée estimée de l'étale, ou par la mise en place d'un accès à une autre ressource. L'analyse locale qui consiste à mettre un groupe électrogène n'est donc pas pertinente. Les trois niveaux d'analyse sont donc essentiels pour évaluer la pertinence d'une nouvelle mesure face à une vignette.

Cette méthode propose une structure commune d'évaluation, adaptée aux contraintes contractuelles de service et aux niveaux de performance qui déclenchent un processus de gestion de crise chez un opérateur. Elle permet également d'analyser rapidement les voies d'amélioration du système (diminution de la vulnérabilité). Elle montre cependant déjà quelques limites. La vulnérabilité mesurée ici correspond à une performance du système à un moment donné, et aucune pondération dans la méthode d'évaluation ne permet de privilégier l'une ou l'autre des pistes d'amélioration. De plus aucune notion de coût n'est associée aux pistes d'amélioration qui peuvent se dégager de cette analyse. Enfin, dès lors que l'on parle de vignettes choisies par les opérateurs, il faut s'attendre à ce qu'elles débouchent toutes sur une vulnérabilité systémique forte (recherche des « pires cas »). Une analyse probabilisée de la menace serait alors nécessaire en amont avant d'engager cette démarche d'analyse de vulnérabilité.

4.1.4 Analyse de la résilience sur le système d'illustration

La résilience peut être mesurée de deux façons. La résilience réelle après une crise, c'est-à-dire *a posteriori*, peut se mesurer sur une évolution de performance constatée, en proposant des temps caractéristiques auxquels mesurer la performance. C'est ce que propose dans un premier temps cette méthodologie. Pour une évaluation de la résilience *a priori*, face à des vignettes définies mais encore non arrivées, la situation est plus complexe. Dès lors que l'on parle d'une réaction, il faut prendre en compte le contexte, les contraintes réglementaires et éventuelles pressions politiques ou juridiques qui sont autant de facteurs qui pourraient perturber la mise en place des réactions prévues dans la planification de la gestion de crise. C'est pourquoi on peut évaluer l'existence de ces capacités de résilience et leur dimensionnement, mais il est difficile de prévoir de façon certaine la réalisation de ces capacités sur une courbe de performance. La résilience *a priori* sera donc évaluée plutôt sur l'existence d'une planification et la qualité de la préparation face à la vignette, sur les moyens de détection et sur le dimensionnement des ressources palliatives disponibles pour obtenir les performances voulues aux même temps caractéristiques que ceux utilisés pour la résilience *a posteriori*. Cette deuxième partie est également présentée par la suite. Comme les vignettes

choisies par les opérateurs correspondent à des situations non réalisées, c'est la résilience *a priori* qui a été appliquée dans le cadre de RESIWATER.

Dans les deux cas, *a posteriori* et *a priori*, la résilience est composée des capacités d'absorption, d'adaptation et de réparation. Nous avons vu dans le chapitre 2 que la capacité d'absorption pouvait être vue comme l'opposée de la vulnérabilité du système, et était associée à la réaction passive du système technique. La capacité d'adaptation correspond, elle, à la réaction en urgence du système, et la capacité de récupération à la mise en place de solutions durables. Malgré l'apparente succession de ces phases, chacune ne commence pas là où la précédente phase se termine, mais elles ont des périodes de recouvrement, comme l'illustre la **Figure 70**.

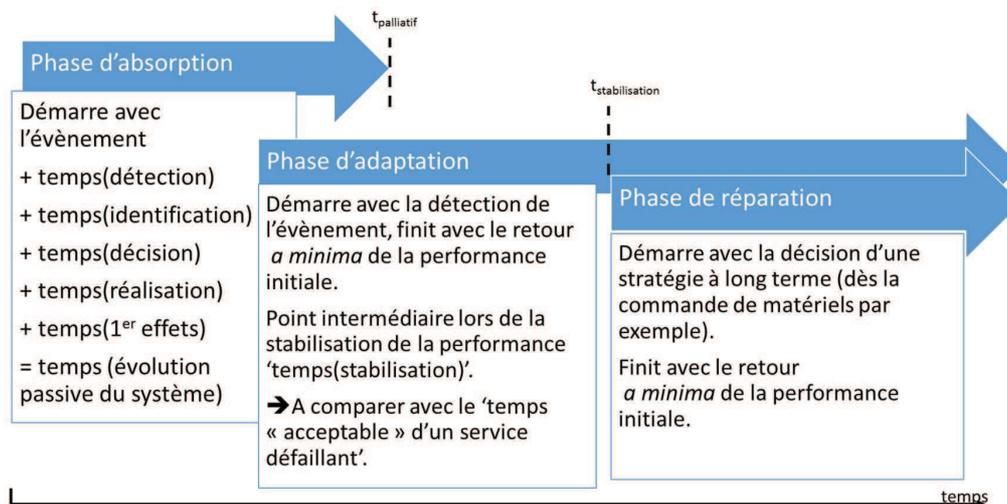


Figure 70 : Echelle temporelle des phases de résilience

La phase d'absorption se termine lorsque l'évolution du système est influencée par la mise en place des actions d'urgence de la phase d'adaptation, c'est-à-dire lorsqu'il quitte la tendance « naturelle » ou « passive » d'évolution. Ce temps caractéristique où les solutions palliatives commencent à prendre effet sera appelé $t_{palliatif}$. Cependant la phase d'adaptation ne commence pas lors de la mise en place de ces actions, mais avant, dès la phase de détection de l'anomalie. Elle se poursuit jusqu'au moment où le système a réussi à endiguer la dégradation de performance jusqu'à retrouver une performance relativement stable, même si celle-ci se base sur des solutions temporaires. Nous appellerons ce temps caractéristique $t_{stabilisation}$. Cependant $t_{stabilisation}$ n'est pas en soi la fin de la phase d'adaptation : celle-ci se termine lorsque plus aucune solution temporaire n'est utilisée pour maintenir la performance du système. C'est-à-dire qu'elle se termine lorsque toutes les solutions à long terme ont été implémentées, à la fin de la phase de réparation, et que le système a retrouvé une performance au moins égale à celle obtenue initialement. Le début de cette phase de réparation est lui

marqué par $t_{\text{stabilisation}}$ dans la mesure où il faut stabiliser un système avant d'essayer d'implémenter des solutions sur le long terme.

4.1.4.1 Capacité d'absorption

Définir $t_{\text{palliatif}}$ signifie connaître par vignette une estimation du temps de détection de l'évènement, connaître le délai de décision (temps de mobilisation de la cellule de crise) et le délai d'implémentation des premières mesures. Pour une bonne capacité d'absorption ($R_{AB}=3$), il faut que $t_{\text{palliatif}}$ soit inférieur à $t_{\text{dégradation}}$ qui correspond sur la courbe d'évolution naturelle au temps pour lequel la performance est égale au seuil limite contractuel P_{normal} . Si on définit $t_{\text{défaillant}}$ comme le moment où l'évolution passive de la performance conduit à un système défaillant ($P = P_{\text{défaillant}}$), on a une capacité d'absorption $R_{AB}=1$ si $t_{\text{palliatif}}$ est supérieur à $t_{\text{défaillant}}$, et une capacité d'absorption $R_{AB}=2$ si $t_{\text{palliatif}}$ est compris entre $t_{\text{dégradation}}$ et $t_{\text{défaillant}}$. La figure ci-dessous illustre ces trois états.

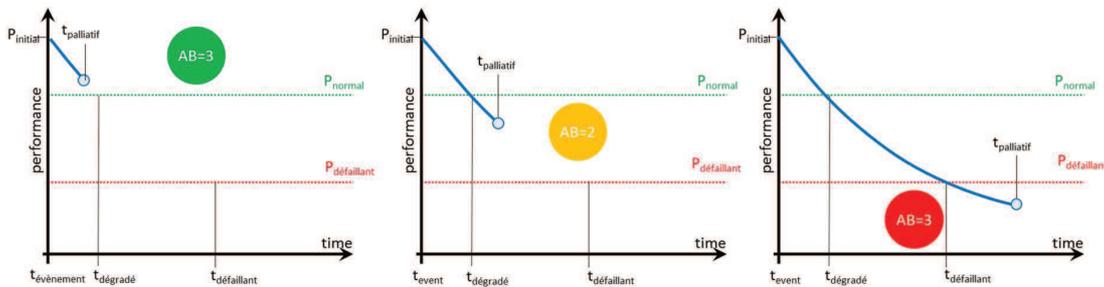


Figure 71 : les temps caractéristiques pour évaluer la capacité d'absorption

En résumé, on a l'algorithme suivant:

Si $t_{\text{palliatif}} < t_{\text{dégradation}}$ (Etat à $t_{\text{palliatif}} = \text{NORMAL}$) Alors $R_{AB} = 3$

Si $t_{\text{dégradation}} < t_{\text{palliatif}} < t_{\text{défaillant}}$ (Etat à $t_{\text{palliatif}} = \text{DEGRADE}$) Alors $R_{AB} = 2$

Si $t_{\text{défaillant}} < t_{\text{palliatif}}$ (Etat à $t_{\text{palliatif}} = \text{DEFAILLANT}$) Alors $R_{AB} = 1$

Pour rappel, nous avons défini la vulnérabilité du système comme étant égale à la capacité d'absorption. Il est cependant à noter que les échelles de vulnérabilité et de résilience sont inversées : une grande vulnérabilité signifie une marque de 3, alors qu'une faible résilience signifie une marque de 1. Nous avons donc l'équivalence suivante entre la vulnérabilité du système et la capacité d'absorption :

$$V_{\text{système}}(t_{\text{palliatif}}) = 4 - R_{AB} \leftrightarrow R_{AB} = 4 - V_{\text{système}}(t_{\text{palliatif}}) \quad (3)$$

Application au système d'illustration

Dans ce système simple, on a $t_{\text{palliatif}} > t_{\text{défaillant}} = 1$ jour, donc $V_{\text{système}} = 3$ et $R_{AB} = 1$.

4.1.4.2 Capacité d'adaptation a posteriori

La capacité d'adaptation est définie comme la capacité à atteindre un niveau stabilisé de performance à $t_{\text{stabilisation}}$, dans un délai acceptable $t_{\text{acceptable}}$ d'un point de vue temporel vis-à-vis des conséquences sociétales extérieures ou d'un point de vue financier interne (délai

Chapitre 4 : Vulnérabilité et résilience des réseaux techniques à destination des opérateurs

maximum d'interruption d'activité avant faillite de l'entreprise). Seule la théorie sera expliquée sur la capacité d'absorption *a posteriori*, c'est-à-dire après observation de cette courbe de performance face à un scénario. De même que pour la capacité d'absorption, la capacité d'adaptation est définie par l'algorithme suivant. Nous y distinguons deux catégories : si la stabilisation arrive avant le délai acceptable de service dégradé, ou si elle arrive après ce délai.

```

If  $t_{\text{stabilisation}} \leq t_{\text{acceptable}}$ 
  Then
    If STATE @  $t_{\text{stabilisation}}$  = NORMAL           Then  $R_{AD} = 3$ 
    If STATE @  $t_{\text{stabilisation}}$  = DEGRADE         Then  $R_{AD} = 2$ 
    If STATE @  $t_{\text{stabilisation}}$  = DEFAILLANT      Then  $R_{AD} = 1$ 
  Endif
Elseif  $t_{\text{acceptable}} < t_{\text{stabilisation}}$ 
  Then
    If STATE @  $t_{\text{stabilisation}}$  = NORMAL           Then  $R_{AD} = 2$ 
    If STATE @  $t_{\text{stabilisation}}$  = DEGRADE         Then  $R_{AD} = 1$ 
    If STATE @  $t_{\text{stabilisation}}$  = DEFAILLANT      Then  $R_{AD} = 1$ 
  Endif
Endif
  
```

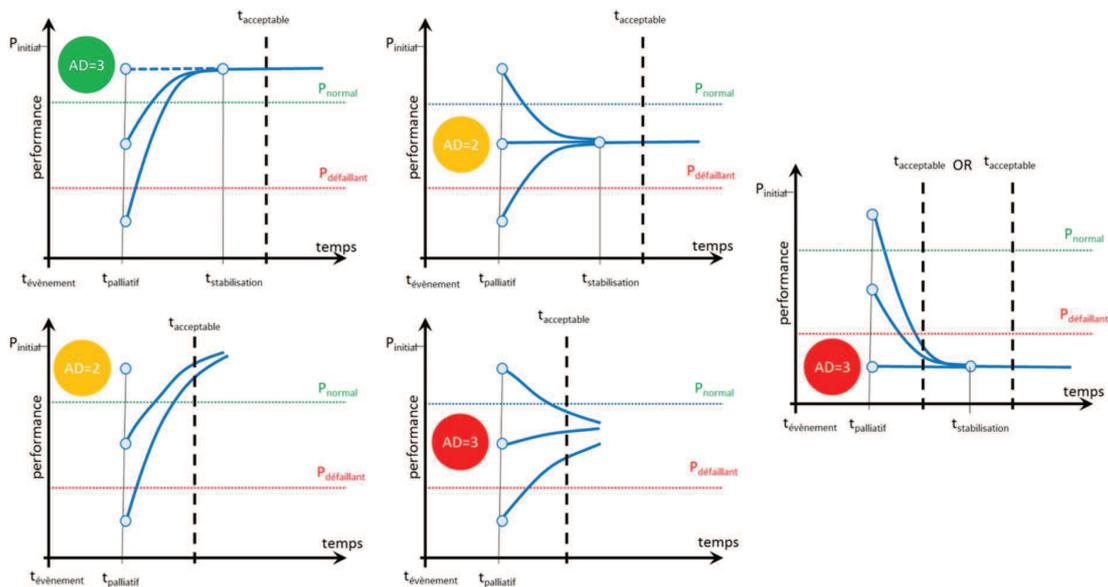


Figure 72 : Capacité d'adaptation *a posteriori*

La description précédente est principalement théorique. Dans une approche *a priori*, nous nous intéresserons à évaluer la cohérence des ressources et processus avec l'objectif d'atteindre les seuils de délais et de performance d'une bonne capacité d'adaptation ($R_{AD}=3$). C'est ce qui est présenté dans le paragraphe suivant.

4.1.4.3 Capacité d'adaptation a priori

Il existe deux services à analyser : la capacité d'adaptation du réseau technique à fournir le service (distribuer de l'eau potable par exemple), et la capacité d'adaptation de l'organisation à fournir un service dégradé de façon alternative si la vignette l'exige (distribution de bouteilles d'eau, mise en place de générateurs de secours pour les quartiers sans électricité, etc.). Elles seront évaluées du point de vue de la préparation de l'organisation et du dimensionnement des ressources. Ces adaptations se basent au préalable sur l'existence d'une capacité de détection des effets des vignettes. L'ensemble des aspects étudiés est résumé dans le tableau ci-dessous.

Table 32 : Aspects évalués pour la capacité d'adaptation R_{AD} a priori

Détection	R _{AD} (Détection)	
	Evaluation de la préparation	Dimensionnement des ressources disponibles
Capacité d'adaptation du réseau technique (si elle existe)	R _{AD} technique(Préparation)	R _{AD} technique (Ressources)
Capacité d'adaptation de l'organisation à fournir un service non-nominal si nécessaire	R _{AD} organisation(Préparation)	R _{AD} organisation (Ressources)

La table ci-dessous propose un questionnaire d'évaluation de ces capacités d'adaptation. C'est ce questionnaire qui a été utilisé par les opérateurs de réseau d'eau dans leurs études de cas (présentées dans un second paragraphe).

Table 33 : Questionnaire d'évaluation de la capacité d'adaptation *a priori* sur l'aspect détection

	Question (Non Résilient: 1, Résilient: 3)	1	2	3
a	<p>Il faut établir en premier la capacité de détection de la perte de performance du réseau face à la vignette considérée.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Il existe des détecteurs capables d'informer en temps réel la salle de gestion d'une perte de performance. L'instant de détection précède donc l'instant de défaillance → R_{AD} (Détection interne)=3 • Il existe quelques détecteurs, mais le délai de détection est extrêmement variable et difficile à évaluer → R_{AD} (Détection interne)=2 • Il existe quelques détecteurs, mais l'instant de détection suit l'instant de défaillance, ou il n'existe pas de détecteur en interne → R_{AD} (Détection interne)=1 			
a*	<p>Si la vignette concerne un évènement naturel majeur qui a une dynamique lente (inondation, pluie intense, etc.):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Il existe un système d'alerte précoce face à cette vignette et le réseau connaît son seuil d'intensité au-delà duquel il risque des dégâts matériels → R_{AD} (Détection externe)=3 • Il existe un système d'alerte précoce face à cette vignette mais le réseau ne connaît pas son seuil d'intensité au-delà duquel il risque des dégâts matériels → R_{AD} (Détection externe)=2 • Il n'existe pas de système d'alerte précoce face à cette vignette → R_{AD} (Détection externe)=1 			
	<p>Bilan: Si la vignette concerne un évènement naturel majeur qui a une dynamique lente $R_{AD}(\text{Detection}) = \text{MIN} [R_{AD} (\text{Détection externe}), R_{AD} (\text{Détection interne})]$</p>			

Le questionnaire ci-dessous s'intéresse aux aspects techniques et organisationnels. Nous considérons qu'il est possible d'avoir une capacité d'adaptation technique très bonne $R_{AD\text{ technique}}=3$. Cependant, nous considérons que la capacité d'adaptation de l'organisation à distribuer un service non-nominal signifie que le réseau est dans un mode défaillant et que donc on a au mieux $R_{AD\text{ organisation}}=2$.

Table 34 : Questionnaire d'évaluation de la capacité d'adaptation technique *a priori* hors aspect détection

	Question (Non Résilient: 1, Résilient: 3)	1	2	3
b	<p>Evaluation de la capacité technique d'adaptation par vignette :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Il existe une reconfiguration du réseau (par ouverture de vannes par exemple) et cette solution permet au système de retrouver une performance au moins égale au seuil contractuel avant $t_{acceptable}$ → $R_{AD\ technique} (Efficacité)= 3$ • Il existe une reconfiguration du réseau mais cette solution implique une dégradation de service (en quantité ou qualité) → $R_{AD\ technique} (Efficacité)= 2$ • Il n'existe pas de reconfiguration du réseau → $R_{AD\ technique} (Efficacité)= 1$ 			
c	<p>Si $R_{AD\ technique} (Efficacité) \geq 2$: Evaluation de la préparation technique à utiliser cette reconfiguration :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Existe-t-il une procédure dédiée explicitant cette reconfiguration d'urgence (planification) ? • Cette reconfiguration a-t-elle été testée ? <p>Si les deux points existent → $R_{AD\ technique}(Préparation)=3$, Si un des points existe → $R_{AD\ technique}(Préparation)=2$, Si aucun point n'existe → $R_{AD\ technique}(Préparation)=1$</p>			
d	<p>Si $R_{AD\ technique} (Efficacité) \geq 2$: Evaluation des ressources disponibles au sein du réseau technique pour mettre en place la reconfiguration. Quel délai supplémentaire de résistance cette solution apporte-t-elle?</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cette solution assure une performance minimale pour une durée supérieure au délai d'implémentation des solutions de réparation à long terme. → $R_{AD\ technique} (Ressources)=3$ • Cette solution assure une performance minimale pour une durée supérieure à la moitié du délai d'implémentation des solutions de réparation à long terme. → $R_{AD\ technique} (Ressources)=2$ • Cette solution ne peut pas réduire de façon significative la défaillance du réseau → $R_{AD\ technique} (Ressources)=1$ 			
	<p>$R_{AD\ technique}$ signature: et $R_{AD\ technique} =$ $MIN[R_{AD\ technique} (Efficacité), R_{AD\ technique}(Préparation), R_{AD\ technique} (Ressources)]$</p>			

Table 35 : Questionnaire d'évaluation de la capacité d'adaptation organisationnelle, a priori, à fournir une solution alternative au service contractuellement prévu

	Question (Non Résilient: 1, Résilient: 3)	1	2	3
e	<p>Si la vignette implique une défaillance de service, évaluation de la préparation de l'organisation à utiliser cette solution (distribuer des bouteilles ici) :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Existe-t-il une procédure dédiée à la distribution de bouteilles dans la planification des actions d'urgence ? • Existe-t-il un plan de communication aux consommateurs? <p>S'il existe au moins un point → $R_{AD\ organisation}(Préparation)=2$ Si aucun point n'est disponible → $R_{AD\ organisation}(Préparation)=1$</p>			
f	<p>Si la vignette implique une défaillance de service, évaluation des ressources disponibles au sein de l'organisation pour mettre en place ce service non-nominal. Quel délai supplémentaire de compensation cette solution apporte-t-elle ? Ici nous considérons un stock de bouteilles d'eau, en tenant compte de la possibilité de réapprovisionnement.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le stock peut satisfaire une consommation personnelle (hors industrie) d'au moins la moitié du délai d'implémentation des solutions de réparation à long terme → $R_{AD\ organisation}(Ressources)=2$ • Le stock ne peut pas compenser sur une durée significative la défaillance du réseau → $R_{AD\ organisation}(Ressources)=1$ 			
	<p>$R_{AD\ organisation\ signature}$: $R_{AD\ organisation} = \text{MIN}[R_{AD\ organisation}(Préparation), R_{AD\ organisation}(Ressources)]$</p>			

4.1.4.4 Capacité de réparation

Elle est définie comme la capacité à retrouver un niveau de performance au moins égal à celui initial. Il est difficile d'estimer cette capacité de réparation R_{RE} a priori. Nous nous concentrerons sur deux indicateurs, d'un côté les ressources disponibles et les coûts supportables par l'organisation pour cette réparation, de l'autre la rapidité de mise en place des solutions à long terme. Le questionnaire dédié à cette capacité est relativement simple.

Table 36 : Evaluation de la capacité de réparation

	Question (Non Résilient: 1, Résilient: 3)	1	2	3
g	<ul style="list-style-type: none"> • Existe-t-il une solution de réparation acceptable en termes de coût dans un délai acceptable $t_{fin\ de\ réparation} < t_{acceptable}$? → $R_{RE}=3$ • Existe-t-il une solution acceptable en termes de coût mais $t_{fin\ de\ réparation} > t_{acceptable}$? → $R_{RE}=2$ • Il n'existe pas de solution financièrement acceptable → $R_{RE}=1$ 			

4.1.4.5 Application au cas illustratif de la capacité d'adaptation et de réparation

Rappel : la vignette représente une inondation par débordement d'une rivière. Le système est représenté ci-dessous à la fin de la phase d'absorption.

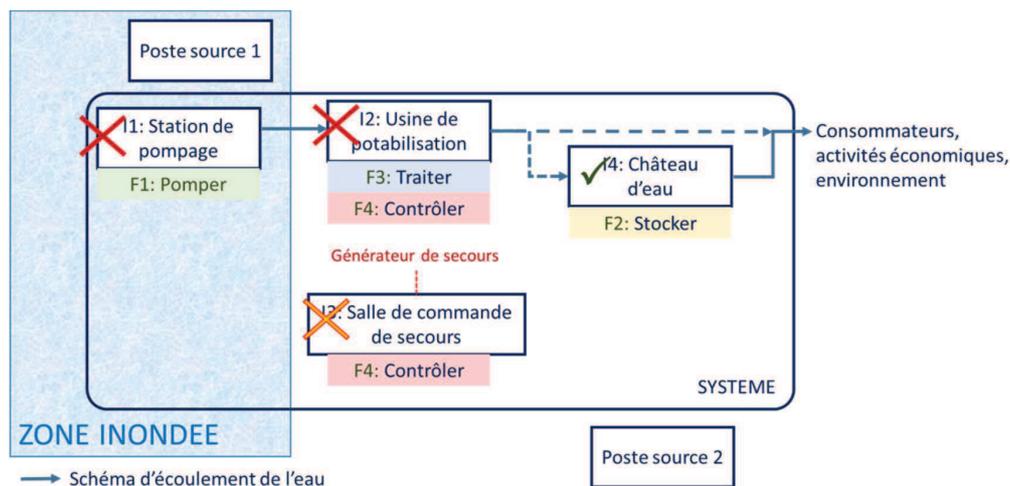


Figure 73 : Etat du système illustratif à la fin de la phase d'absorption

Afin d'illustrer l'application des questionnaires précédents, les paragraphes suivants décrivent la réaction du système illustratif. Nous avons fait l'hypothèse que l'inondation durait 3 jours, et qu'il y avait un jour de stock d'eau. Le site de prévision des crues « VigiCrue » est considéré comme l'outil d'alerte précoce associé à cette vignette. Nous avons $t_{\text{défaillant}} (=1j) < t_{\text{palliatif}}$. Le système est défaillant au bout d'un jour. Nous faisons l'hypothèse que la solution de réparation de la station de pompage est abordable financièrement, et que les gestionnaires ont les pièces de rechange et une équipe disponible pour réaliser les travaux en moins de sept jours après le retrait des eaux. Dans cet exemple, il n'y a pas de possibilité de reconfiguration, donc le niveau de performance peut être stabilisé uniquement à la fin de la réparation et donc de la crise $t_{\text{stabilisation}} = t_{\text{fin de réparation}}$. Pour compenser ces neuf jours sans eau courante, le gestionnaire de réseau peut anticiper l'achat et le stockage des bouteilles selon l'étendue de la zone privée d'eau. Dans cet exemple illustratif, nous partirons du principe qu'il est possible de stocker et d'acheminer des bouteilles d'eau pour l'ensemble des particuliers sur les 10 jours, et que cette procédure existe et a été testée. Dans un exemple plus réaliste que le système illustratif, (quartiers de ville, territoire rural étendu), il n'est pas forcément évident d'être capable d'acheminer des stocks de bouteilles si importants en si peu de temps, en plus de la problématique du coût ! De plus, une consommation d'eau en bouteille n'est pas acceptable pour des interruptions s'étendant sur plusieurs semaines ou mois. Dans certaines situations extrêmes, où il est notamment difficile d'évacuer sur de longues périodes les résidents, il est possible que la pression politique pousse le gestionnaire à réalimenter le réseau en diminuant la qualité de l'eau distribuée afin de préserver l'activité économique, le fonctionnement des égouts, etc. Or, cette décision politique entraînerait une augmentation du coût et du délai de réparation (nettoyage du réseau pour retrouver après coup une qualité d'eau équivalente à l'initiale). Cette décision politique reflète le délai socialement « acceptable » d'interruption de l'eau. Nous ferons l'hypothèse pour ce système illustratif que ce délai vaut $t_{\text{acceptable}}=15j$.

Nous avons donc : $t_{\text{défaillant}} (=1 j) < t_{\text{palliatif}} (=3 j)$; $t_{\text{stabilisation}} = t_{\text{fin de réparation}} = 10 j$; $t_{\text{acceptable}} = 15 j$.

Evaluation de la capacité d'adaptation

La constatation (donc la détection) d'une inondation est évidente lorsque l'on parle d'usine de traitement qui fonctionne avec du personnel sur place. La seule possibilité de reconfiguration du réseau correspond à l'alimentation des consommateurs uniquement par le réservoir et non plus directement par l'usine. Il s'agit d'une réaction « automatique » du système, telle que définie dans les procédures de gestion de la salle de commande. Le château d'eau peut alimenter les consommateurs une journée, c'est-à-dire moins que la moitié du délai de réparation estimé (10 j). Le questionnaire ci-dessous permet d'évaluer la capacité d'adaptation sur ces différents aspects.

Table 37 : Capacité de détection du cas illustratif

	Question (Non Résilient: 1, Résilient: 3)	1	2	3
a	<p>Il faut établir en premier la capacité de détection de la perte de performance du réseau face à la vignette considérée.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Il existe des détecteurs capables d'informer en temps réel la salle de gestion d'une perte de performance. L'instant de détection précède donc l'instant de défaillance → $R_{AD}(\text{Détection interne})=3$ • Il existe quelques détecteurs, mais le délai de détection est extrêmement variable et difficile à évaluer → $R_{AD}(\text{Détection interne})=2$ • Il existe quelques détecteurs, mais l'instant de détection suit l'instant de défaillance, ou il n'existe pas de détecteur en interne → $R_{AD}(\text{Détection interne})=1$ 			X
a*	<p>Si la vignette concerne un évènement naturel majeur qui a une dynamique lente (inondation, pluie intense, etc.):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Il existe un système d'alerte précoce face à cette vignette et le réseau connaît son seuil d'intensité au-delà duquel il risque des dégâts matériels → $R_{AD}(\text{Détection externe})=3$ • Il existe un système d'alerte précoce face à cette vignette mais le réseau ne connaît pas son seuil d'intensité au-delà duquel il risque des dégâts matériels → $R_{AD}(\text{Détection externe})=2$ • Il n'existe pas de système d'alerte précoce face à cette vignette → $R_{AD}(\text{Détection externe})=1$ 			X
	<p>Bilan: Si la vignette concerne un évènement naturel majeur qui a une dynamique lente $R_{AD}(\text{Détection})= \text{MIN} [R_{AD}(\text{Détection externe}), R_{AD}(\text{Détection interne})]$</p>			X

Table 38 : capacité d'adaptation du cas illustratif

	Question (Non Résilient: 1, Résilient: 3)	1	2	3
b	<p>Evaluation de la capacité technique adaptation par vignette :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Il existe une reconfiguration du réseau (par ouverture de vannes par exemple) et cette solution permet au système de retrouver une performance au moins égale au seuil contractuel avant $t_{\text{acceptable}}$ $\rightarrow R_{AD \text{ technique}} (\text{Efficacité})= 3$ • Il existe une reconfiguration du réseau mais cette solution implique une dégradation de service (en quantité ou qualité) $\rightarrow R_{AD \text{ technique}} (\text{Efficacité})= 2$ • Il n'existe pas de reconfiguration du réseau $\rightarrow R_{AD \text{ technique}} (\text{Efficacité})= 1$ 		X	
c	<p>Si $R_{AD \text{ technique}} (\text{Efficacité}) \geq 2$: Evaluation de la préparation technique à utiliser cette reconfiguration :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Existe-t-il une procédure dédiée explicitant cette reconfiguration d'urgence (planification) ? • Cette reconfiguration a-t-elle été testée ? <p>Si les deux points existent $\rightarrow R_{AD \text{ technique}}(\text{Préparation})=3$, Si un des points existe $\rightarrow R_{AD \text{ technique}}(\text{Préparation})=2$, Si aucun point n'existe $\rightarrow R_{AD \text{ technique}}(\text{Préparation})=1$</p>			X
d	<p>Si $R_{AD \text{ technique}} (\text{Efficacité}) \geq 2$: Evaluation des ressources disponibles au sein du réseau technique pour mettre en place la reconfiguration. Quel délai supplémentaire de résistance cette solution apporte-t-elle?</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cette solution assure une performance minimale pour une durée supérieure au délai d'implémentation des solutions de réparation à long terme. $\rightarrow R_{AD \text{ technique}} (\text{Ressources})=3$ • Cette solution assure une performance minimale pour une durée supérieure à la moitié du délai d'implémentation des solutions de réparation à long terme. $\rightarrow R_{AD \text{ technique}} (\text{Ressources})=2$ • Cette solution ne peut pas réduire de façon significative la défaillance du réseau $\rightarrow R_{AD \text{ technique}} (\text{Ressources})=1$ 	X		
	<p>$R_{AD \text{ technique}}$ signature: $R_{AD \text{ technique}} (\text{Efficacité})$ $R_{AD \text{ technique}}(\text{Préparation})$ $R_{AD \text{ technique}} (\text{Ressources})$ et $R_{AD \text{ technique}} =$ $\text{MIN}[R_{AD \text{ technique}} (\text{Efficacité}), R_{AD \text{ technique}}(\text{Préparation}), R_{AD \text{ technique}} (\text{Ressources})]$</p>	X		

Chapitre 4 : Vulnérabilité et résilience des réseaux techniques à destination des opérateurs

	Question (Non Résilient: 1, Résilient: 3)	1	2	3
e	<p>Si la vignette implique une défaillance de service, évaluation de la préparation de l'organisation à utiliser cette solution (distribuer des bouteilles ici) :</p> <ul style="list-style-type: none"> Existe-t-il une procédure dédiée à la distribution de bouteilles dans la planification des actions d'urgence ? Existe-t-il un plan de communication aux consommateurs? <p>S'il existe au moins un point → $R_{AD\ organisation}(Préparation)=2$ Si aucun point n'est disponible → $R_{AD\ organisation}(Préparation)=1$</p>		X	
f	<p>Si la vignette implique une défaillance de service, évaluation des ressources disponibles au sein de l'organisation pour mettre en place ce service non-nominal. Quel délai supplémentaire de compensation cette solution apporte-t-elle ? Ici nous considérons un stock de bouteilles d'eau, en tenant compte de la possibilité de réapprovisionnement.</p> <ul style="list-style-type: none"> Le stock peut satisfaire une consommation personnelle (hors industrie) d'au moins la moitié du délai d'implémentation des solutions de réparation à long terme → $R_{AD\ organisation}(Ressources)=2$ Le stock ne peut pas compenser sur une durée significative la défaillance du réseau → $R_{AD\ organisation}(Ressources)=1$ 		X	
	<p>$R_{AD\ organisation\ signature} = R_{AD\ organisation}(Préparation) R_{AD\ organisation}(Préparation)$ $R_{AD\ organisation} = \text{MIN}[R_{AD\ organisation}(Préparation), R_{AD\ organisation}(Ressources)]$</p>		X	

On obtient une signature de la capacité d'adaptation qui est la suivante sur cette vignette:

$$R_{AD}(\text{Détection}) R_{AD\ technique} R_{AD\ organisation}$$

Enfin, il existe une solution acceptable en termes financiers et en délai.

Table 39 : Evaluation de la capacité de réparation du cas illustratif

	Question (Non Résilient: 1, Résilient: 3)	1	2	3
g	<ul style="list-style-type: none"> Existe-t-il une solution de réparation acceptable en termes de coût dans un délai acceptable $t_{fin\ de\ réparation} < t_{acceptable}$? → $R_{RE}=3$ Existe-t-il une solution acceptable en termes de coût mais $t_{fin\ de\ réparation} > t_{acceptable}$? → $R_{RE}=2$ Il n'existe pas de solution financièrement acceptable → $R_{RE}=1$ 			X

Conclusion du système d'illustration

On obtient la signature de la vulnérabilité et de la résilience suivante :

$$(I1\ I2\ I3\ I4 ; F1\ F2\ F3\ F4)$$

$$(V_{système, qualité}=1 ; V_{système, pression}=3)$$

$$\text{Donc } V_{système} = 3,$$

$$R_{AB} [R_{AD}(\text{Détection}) R_{AD\ technique} R_{AD\ organisation}] R_{RE}$$

Sur cette signature, il apparaît deux points faibles de la résilience du système :

- la vulnérabilité physique de l'infrastructure de pompage,

Chapitre 4 : Vulnérabilité et résilience des réseaux techniques à destination des opérateurs

- et une incapacité d'adaptation technique face à cette vulnérabilité (nécessité d'augmenter le stock ou de pouvoir se brancher sur une autre source)

Conclusion sur la méthode

Cette méthode s'appuie sur la connaissance des seuils de défaillance et des critères de performance de l'entreprise, qui forment des critères communs à l'ensemble des réseaux. Ils doivent donc être à chaque fois spécifiés et commentés. L'exemple précédent a permis d'illustrer un cas simple d'application. L'Annexe 6 présente une seconde application sur le réseau d'eau fictif de Saint-Nazaire, étudié dans la partie 3.5. La partie suivante présente les réseaux et les cas d'étude choisis par les opérateurs dans le cadre du projet RESIWATER. Les conclusions sur l'applicabilité de la méthode, ses avantages et ses limites sont présentées à la suite de ces cas.

4.2 Cas d'application de la méthode précédente sur trois réseaux d'eau

Véolia Île-de-France (VEDIF, distribution d'eau à 4,5 millions d'habitants), Eurométropole de Strasbourg (420 000 habitants) et Berlin Wasser Betriebe (BWB, distribution d'eau à 3,7 millions de personnes) ont appliqué la méthode précédente à leur réseau, sur les trois vignettes distinctes qu'ils souhaitaient chacun étudier. Les résultats ont été jugés comme sensibles, donc aucun résultat d'application n'est présenté dans ce document. En revanche, les cas d'étude évalués, les différences des réseaux et les différences d'appropriation de la méthode sont présentés ci-après. Ces applications dans le cadre du projet RESIWATER ont permis de souligner les points positifs et les voies d'amélioration de la méthode [Grangeat, RESIWATER, 2016] [Grangeat2016, h].

Chaque gestionnaire a présenté son réseau en termes de consommation, de cartographie des infrastructures et de description des infrastructures types sur son territoire. La première étape consiste à identifier les infrastructures. Les trois gestionnaires ont chacun les infrastructures suivantes, qu'ils ont détaillées par instance, en termes de capacité et de localisation :

- infrastructures de prise d'eau (puits ou eau de surface) avec leur nom et leur débit ;
- salles de commande ;
- stations de pompage ;
- stations de chloration ;
- infrastructures de stockage ;
- stations de transfert ;
- canalisations de transport par secteur ;
- secteurs de distribution (un secteur correspond uniquement à une zone où les gestionnaires peuvent mesurer le débit entrant et sortant, ce n'est pas une zone de distribution attribuée à une infrastructure spécifique de stockage) ;
- points d'interconnexions avec les réseaux mitoyens.

Ils ont également listé les 6 fonctions principales des infrastructures du réseau, à savoir :

- contrôler ;
- capter la ressource eau ;

Chapitre 4 : Vulnérabilité et résilience des réseaux techniques à destination des opérateurs

- traiter ;
- transporter ;
- stocker ;
- distribuer.

Cette description est suivie d'une carte du territoire, et dans deux cas sur trois par une carte représentant les liens fonctionnels entre ces infrastructures type. Les trois partenaires ont créé un tableau pour l'analyse de la vulnérabilité, avec en première colonne la liste des infrastructures de leur réseau (classée par catégorie), en deuxième colonne l'évaluation de la vulnérabilité physique de chaque infrastructure par vignette, en troisième colonne les fonctions concernées et si elles étaient impactées (vulnérabilité fonctionnelle), et en dernière ligne le bilan de vulnérabilité systémique. Pour l'analyse de résilience, ils ont utilisé le questionnaire précédent, et synthétisé dans un tableau les résultats et commentaires brefs justifiant la note attribuée.

Sur les trois partenaires, un a souhaité pondérer ses infrastructures par leur importance relative pour ne pas considérer un secteur de distribution au même niveau qu'une usine de potabilisation par exemple. Cette pondération a influencé uniquement l'indicateur global de vulnérabilité physique, qui n'est pas utilisé pour la suite de l'analyse mais donne un indice de l'importance générale des dégâts matériels sur le réseau face à la vignette. La figure ci-dessous représente la table utilisée. Pour des raisons de sensibilité de résultat, le nom de l'opérateur, le nom des infrastructures et leur nombre, ainsi que la vignette étudiée ne sont pas donnés.

Chapitre 4 : Vulnérabilité et résilience des réseaux techniques à destination des opérateurs

VULNERABILITY ASSESSMENT										
Type of infrastructure (weight)	Name (Id)	Initial vulnerability	Initial functional vulnerability						system vulnerability	
			Control	Intake	Treatment	Transport	Storage	distribution	Pressure	Quality
SWTP (5)	1	1	1	1	1	1				
	2	2	1	1	2					
DWWTP (4)	3	1		1	1					
	4	1		1	1					
Central control (1)	5	1	1							
Pumping stations (3)	6	1					1			
	7	1					1			
	8	1					1			
	9	1					1			
Chlorination stations (2)	10	1					1			
	11	1			1					
	12	1			3					
	13	1			1					
	14	2			1					
	15	1			3					
	16	1			1					
	17	1			1					
Storage tanks (3)	18	1			3					
	All 1st elevation tanks:									
	19	1						1		
	20	1						1		
	21	1						1		
	22	1						1		
	23	1						1		
	All 2nd elevation tanks:									
	24	1						1		
	25	1						1		
Transfert plants (3)	26	1						1		
	27	1						1		
	28	1						1		
Trunk mains (0,01)	29	1						1		
	30	1						1		
Network zones (0,01)	31	1						1		
	32	1						1		
	x	1						1		
	33	1						2		
Communication points (0,5)	34	1						2		
	35	1						2		
	36	1						2		
Communication points (0,5)	Import							2		
	37	1								
	38	1								
	39	1								
	Mixte									
	40	1								
	41	1								
42	1									
43	1									
(weight)	Global	1,05	1	1	1,6	1	1	2	2	2
RESILIENCE ASSESSMENT										
Adsorptive capacity	Adaptative capacity - a posteriori		Adaptative capacity - a priori				Restorative capacity			
	stabilization	state	Detection	technical	organizational	Preparedness	resourcefulness			
	> acceptable*	Normal	3	2*	Preparedness	resourcefulness	2	2		
	2			2**	3	2				
*Took time to adapt treatment to avoid bromates formation										
**corrective action produces degraded perf in term of quality										

Figure 74 : Illustration de la table utilisée par les opérateurs pour calculer leur vulnérabilité et leur capacité de résilience

4.2.1 Présentation des études de cas choisies par les opérateurs de réseaux d'eau potable

BWB (gestionnaire du réseau d'eau de Berlin) a choisi les trois scénarios suivants :

- une coupure d'électricité à l'échelle régionale en plein été. Malgré la présence de générateurs de secours, BWB a simulé une difficulté d'approvisionnement en hydrocarbures étant donné le besoin régional immédiat de cette ressource, et l'évolution des zones privées d'eau au cours du scénario ;
- la détection d'un agent pathogène dans le réseau, au milieu du mois d'août, lors d'un contrôle de routine. Ils ont supposé les contre-mesures prises, compte-tenu des différents délais d'analyse des échantillons et des ressources disponibles ;
- une cyber-attaque sur leur système de contrôle, leur faisant croire que le système fonctionne normalement alors que les riverains appellent pour des baisses de pression (en hiver).

Eurométropole de Strasbourg a choisi les trois scénarios suivants :

- Une inondation centennale par débordement du Rhin, début mai, sur une durée de 5 jours ;
- Une pollution volontaire du réseau d'eau au niveau d'une canalisation de transport ;
- Une combinaison entre une coupure d'électricité et une cyber-attaque qui laisse croire que la situation est normale sur le réseau.

VEDIF a choisi les trois scénarios suivants :

- en période de forte chaleur, de nombreux poteaux d'incendie sont ouverts simultanément dans certains quartiers pour jouer avec l'eau. Cet événement a lieu en même temps que l'arrêt d'une infrastructure de redondance pour maintenance ;
- lors d'un événement politique majeur, simulation d'une pollution volontaire à proximité de l'évènement ;
- la crue centennale en Île-de-France.

Les neuf scénarios précédents présentent des similitudes mais ne peuvent pas pour autant être comparés entre les réseaux. Les territoires, contextes et réseaux sont bien trop différents. Cependant il a été possible d'attribuer des notes de résilience à chacun de ces scénarios, ce qui prouve au moins l'aspect transposable de la méthode. La partie suivante résume les commentaires formulés par les opérateurs, les limites identifiées et les avantages de cette méthode.

4.2.2 Synthèse des commentaires formulés par les opérateurs lors de l'utilisation de la méthode et conclusion sur celle-ci

BWB a souligné l'intérêt d'appliquer systématiquement et étape par étape la même méthode afin d'identifier les vulnérabilités et les pistes d'amélioration de la résilience face aux vignettes. BWB souhaite en perspective de ce travail un cadre commun pour mesurer et comparer plus en détail l'efficacité des mesures d'amélioration envisageables.

Chapitre 4 : Vulnérabilité et résilience des réseaux techniques à destination des opérateurs

Eurométropole de Strasbourg a souligné la très grande influence de la description du scénario (par exemple, l'état des stocks d'eau n'est pas la même tout au long de la journée et la vulnérabilité calculée en sera influencée). Ils ont choisi leur cas d'étude pour mettre en évidence le besoin d'un outil d'aide à la décision sur ces cas difficiles à gérer. L'évaluation de leurs cas a montré surtout un besoin d'amélioration de certaines capacités de résilience, et principalement autour de la capacité de détection interne et de l'interprétation des signaux reçus comme aide à la gestion de crise. Ils ont apprécié que la méthode ne se concentre pas uniquement sur la protection physique des infrastructures ou sur l'analyse topologique, comme fait de façon classique par ailleurs.

VEDIF souligne également l'importance de la capacité de détection et d'interprétation dans l'aspect « adaptation » de la résilience, ce qui passe par le développement de détecteurs et l'analyse de leurs signaux. Ils ont également noté le fait que l'utilisation d'un modèle hydraulique signifie qu'il est nécessaire que ce modèle soit validé pour des simulations non nominales, c'est-à-dire non dirigée par la demande (exemple : une explosion de canalisation avec fuite majeure n'est pas simulable actuellement).

L'appropriation de cette méthodologie par les trois opérateurs sur neuf scénarios différents est un point positif pour cette méthodologie. Elle est vue comme un outil capable à froid d'estimer par scénario les vulnérabilités et les axes d'amélioration de la résilience face à chaque vignette. Cependant, elle est très dépendante de la qualité de la description de la vignette, et le choix d'une échelle de trois niveaux ne permet pas de comparer quantitativement l'efficacité des mesures que les opérateurs pourraient vouloir prendre pour s'améliorer. Cette méthode est également plus adaptée aux scénarios soudains (coupure d'électricité par exemple, ou montée des eaux rapide) qu'à des scénarios à dynamiques lentes comme une crue avec une montée des eaux sur plusieurs jours. En effet elle évalue les vulnérabilités à un instant t et en déduit une évolution du système face à cette situation. Sur les cas d'inondation des scénarios précédents, il a été seulement envisagé la situation au moment des plus hautes eaux, mais pas la montée progressive des eaux ni les actions mises en place au fur et à mesure.

En résumé, cette méthode est un outil d'aide à l'identification des vignettes les plus problématiques et des axes d'amélioration par vignette. C'est également un outil d'amélioration de la connaissance du territoire, en autorisant la construction d'une base de données « vignette – signature de vulnérabilité – signature de résilience » par une méthode transposable à plusieurs scénarios. Cette section a donc bien proposé une méthode transposable à différents réseaux d'eau et à différents contextes. Le paragraphe suivant s'intéresse à la transposition de cette méthode à d'autres réseaux techniques.

4.3 Discussion sur l'extension de la méthodologie précédente à d'autres réseaux

4.3.1 Discussion sur les critères de performance des réseaux

La méthode développée ici utilise la notion de « critères de performance ». Ils ne sont pas identiques selon les réseaux étudiés. Nous ne nous intéressons qu'à une situation de crise, et plus particulièrement au moment où une crise pour un opérateur d'importance vitale engendre une crise pour la sécurité civile. La liste ci-dessous explore et discute des critères de performance réseau par réseau. Elle ne s'intéresse pas aux critères de confort (exemple : diminution du débit internet) mais à l'accessibilité aux ressources essentielles à la société (exemple : accès aux télécommunications pour joindre les secours).

- Distribution d'électricité : la disponibilité de la ressource est considérée comme binaire : il y en a ou pas. Si on devait considérer des scénarios à l'échelle nationale ou européenne, il aurait fallu regarder les questions des perturbations des phases et des fréquences des signaux électriques. Elles seront négligées ici au profit de la simple disponibilité du signal électrique. ERDF s'est engagé auprès de l'Etat à réalimenter 100 % des sites sécurisés en moins de 12 heures, 80 % de ses clients coupés en moins de 24 heures, et 90 % des clients impactés par une catastrophe en moins de 5 jours [CGEDD, 2016]. On a donc un critère de performance égal à la fraction de clients impactés initialement qui ont retrouvé le courant (de façon nominale ou à l'aide de groupes électrogènes). L'utilisation d'une fraction signifie que $P_{\text{normal}} = 1$ et qu'elle ne peut pas être dépassée par la courbe de performance. Nous avons également $P_{\text{défaillant}}$ qui n'est plus un seuil fixe, mais qui obéit à une courbe en escalier où $P_{\text{défaillant}}(1 \text{ j}) = 0,8$ et $P_{\text{défaillant}}(5 \text{ j}) = 0,9$. Comme une coupure d'électricité peut être assimilée à un événement instantané et que $P_{\text{normal}} = P_{\text{initial}}$ (car nous utilisons un pourcentage), nous avons $t_{\text{événement}} = t_{\text{dégradé}}$. Aucune pénalité n'a été définie par l'Etat en cas de non-respect de cette courbe pour événement exceptionnel, donc $t_{\text{acceptable}}$ n'est pas contractuellement défini (attention, ERDF doit cependant verser une pénalité aux abonnés impactés par tranche de 6 heures de coupure). En 2014, le temps de coupure moyen de plus de 6 heures hors RTE au titre d'événements exceptionnels était de 12 h (valeur calculée sur les seuls clients coupés). Nous fixerons donc $t_{\text{acceptable}} = 12 \text{ h}$. La figure ci-dessous illustre les courbes et seuils définis précédemment.

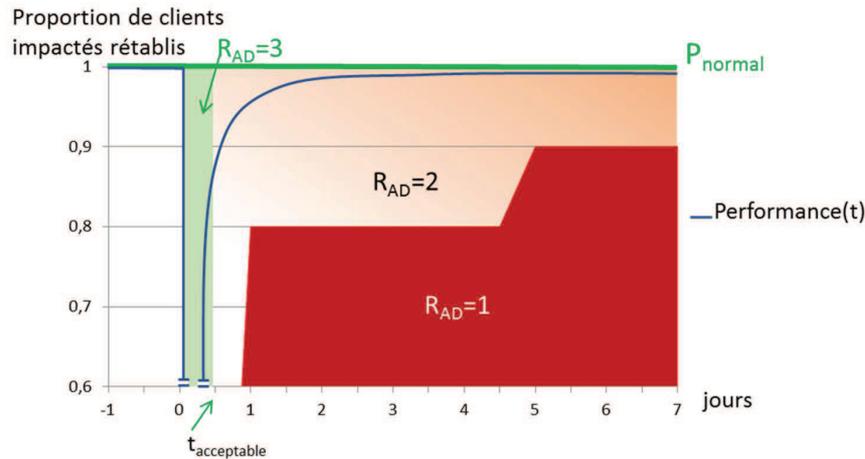


Figure 75 : Seuils de performance pour évaluer la capacité d'adaptation du réseau de distribution d'électricité

- Gaz (distribution): nous avons identifié dans le chapitre 3 l'engagement de GRDF à intervenir en moins de 4 heures suite à un premier appel (s'il est reçu avant 21h), mais ce genre de délai ne semble pas concerner les événements majeurs, ni les demandes d'intervention par les sapeurs-pompiers. Nous ne pouvons donc pas établir une courbe équivalente à celle de l'électricité. Il paraît cohérent de choisir, comme pour l'électricité, une proportion de clients rétablis après coupure comme critère de performance.
- Télécommunications : nous n'avons pas trouvé d'information sur des contraintes réglementaires de délai de retour à la normale pour le réseau filaire. Pour le réseau mobile, en cas de crue centennale en Ile-de-France, le réseau Orange a assuré pouvoir maintenir une couverture mobile à l'extérieur des bâtiments malgré la perte de certains BTS (Base Transceiver Station) sans pour autant préciser s'il s'agissait d'une obligation réglementaire. Les services essentiels de secours (pompiers, SAMU et certaines institutions) peuvent par ailleurs avoir accès aux communications satellites. La vulnérabilité du territoire correspond donc plus à l'accès des populations à un service de télécommunications pour appeler les secours au besoin. Là encore nous pourrions définir « la fraction de surface qui retrouve une couverture réseau extérieure après un impact » comme un indicateur de performance. Il s'agit d'un indicateur d'accessibilité. Les critères de « débit autorisé de transmission d'information » relèvent plutôt d'un indicateur de confort.
- Eau : il existe deux sortes de critère de performance : ceux autour de la disponibilité et ceux autour de la qualité. Le rapport du CGEDD [CGEDD, 2015] déclare que l'urgence est dans un premier temps la distribution de bouteilles d'eau plus que la réparation du réseau en lui-même. Nous n'avons pas trouvé de seuils d'acceptabilité sur une durée d'interruption du service au-delà duquel l'évacuation des populations est conseillée. En revanche le CGEDD déclare qu'une interruption de 2-3 jours de fonctionnement du réseau d'eaux usées est critique dans les lieux à forte densité de population. Or, ce réseau dépend de l'accessibilité à l'eau. Nous avons précédemment

utilisé le critère de « pression minimale constatée sur le réseau impacté par l'évènement » pour le réseau d'eau. Dans un milieu urbain dense, nous supposons donc $t_{\text{acceptable}} = 3$ j et une pression désirée de 2 bar (P_{normal}) pour que les étages des immeubles aient accès à l'eau. Un accès simple à l'eau (pression de 1 bar = $P_{\text{défaillant}}$) peut suffire pour définir la limite basse entre une situation dégradée et une situation défailante. Afin d'être cohérent avec le réseau électricité, il faudrait également comparer avec l'indicateur « proportion des abonnés impactés qui ont retrouvé une pression de 2 bar ». La définition des seuils temporels auxquels une fraction donnée de la population doit avoir accès à l'eau n'est pas anodine car elle est corrélée avec la question du dimensionnement des stocks d'eau et des réservoirs.

Pour étendre la méthode d'analyse de résilience à d'autres réseaux techniques, il faut donc au préalable discuter du choix des indicateurs de performance, et mettre en cohérence les seuils avec les exigences réglementaires et contractuelles des opérateurs. Ces choix des seuils ont une très grande influence sur le processus d'analyse, ils doivent donc être justifiés avant toute évaluation de la résilience et acceptés à la fois par les opérateurs concernés et par les institutions de sécurité civile.

4.3.2 Discussion sur l'applicabilité de la méthode d'évaluation de la vulnérabilité et résilience, complémentarité de la méthode avec la modélisation des effets cascade par couplage faible

L'analyse de la vulnérabilité de la méthode précédente nécessite de vérifier de façon systématique à la fois l'intégrité physique et la disponibilité des services support nécessaires au fonctionnement de chaque infrastructure – donc d'analyser les effets cascade. Si elle devait être appliquée à plusieurs réseaux, cela engendrerait de nombreuses demandes croisées difficiles à gérer. Il serait donc nécessaire de hiérarchiser, par vignette, les demandes d'information, là encore en fonction de l'importance du service fourni. Cette hiérarchisation a été discutée dans le chapitre 3 pour la modélisation des effets cascade, et les mêmes arguments de classement par influence peuvent être utilisés ici. Les réseaux électriques et de télécommunications semblent être ceux dont l'indisponibilité perturbe le plus rapidement le fonctionnement des autres réseaux. Il paraît donc naturel de demander en priorité à ces deux réseaux si, par vignette étudiée, ils envisagent une rupture de service et quelle serait la cartographie des impacts associés. C'est ce qui a été réalisé lors de l'exercice Sequana, avec la diffusion des zones sans électricité et sans télécommunication consécutives aux inondations. Les autres réseaux comme l'eau, le gaz, le réseau vapeur, etc. peuvent être consultés dans un second temps successivement. Il s'agit là d'un couplage faible, avec l'hypothèse que l'on néglige les boucles de rétroactions pour que le processus d'analyse soit réalisable. C'est donc une limite de l'applicabilité de la méthode.

Il faudrait, dans l'idéal, interroger les opérateurs de télécommunications et d'électricité pour chaque vignette de chaque scénario sur leur zone de rupture de service. Afin d'éviter de surcharger ces opérateurs, cela nécessiterait de mutualiser les demandes en regroupant les scénarios envisagés par chacun des réseaux dans une banque de données. Les opérateurs pourront alors proposer une estimation des zones d'impact de rupture de leur service sur

Chapitre 4 : Vulnérabilité et résilience des réseaux techniques à destination des opérateurs

chaque vignette. La communication d'une cartographie des zones d'impact permet aux réseaux techniques de tirer eux-mêmes leur conclusion sur leurs propres vulnérabilités fonctionnelles et de continuer l'analyse en autonomie. La notion de zones d'impact (rupture de service) face à des vignettes rejoint la problématique de modélisation des effets cascade par couplage faible proposée au chapitre 3.

Nous avons vu précédemment qu'il était difficile d'attribuer une zone d'impact par défaillance d'infrastructure, et qu'il fallait passer par la simulation de l'ensemble du réseau pour obtenir une succession de zones d'impact face à une vignette. Une approche indépendante des causes de défaillance – c'est-à-dire focalisée sur la défaillance successive des infrastructures– paraît difficile à envisager. *A contrario*, une approche focalisée sur les menaces signifie une approche extrêmement influencée par le choix des vignettes. Or la description précise des vignettes (heure de l'évènement, période, contexte, etc.) implique un nombre très important de scénarios à considérer, tout en sachant qu'il est impossible d'être exhaustif (limite du modèle). Par exemple, la pollution volontaire au niveau d'une canalisation à l'est d'une ville n'aura pas la même zone d'impact que celle d'une canalisation à l'ouest. Il faut donc prioriser ces vignettes à considérer. Plusieurs options sont envisageables pour cela.

La grande variabilité des vignettes favorise dans un premier temps l'étude des menaces (et vignettes associées) dont la zone d'impact est connue. Cela signifie se concentrer sur les catastrophes prévisibles en localisation (inondation par débordement, par ruissellement). Mais cela exclut les actes malveillants, dont la nature, la localisation et l'ampleur ne sont pas prévisibles. C'est pourquoi dans un deuxième temps il serait utile d'étendre la banque de données à d'autres scénarios englobant les actes malveillants dans une approche non statistique.

Deux types d'approches sont possibles pour les actes malveillants. Soit l'on envisage une sélection par la menace (analyse probabiliste), c'est-à-dire en étudiant sur les vignettes l'attractivité des infrastructures cibles, leur vulnérabilité à l'acte (difficulté de réalisation) et à niveau égal la gravité de leur impact. Cette sélection est centrée sur la défaillance d'une ou de quelques infrastructures, et ne concerne que peu les scénarios étendus, nécessitant beaucoup de moyens (difficulté forte de réalisation). Soit l'on envisage une approche systématique, où par scénario on établit les infrastructures vulnérables à ce genre de menace. Puis l'on teste de nombreuses combinaisons de vignettes, indépendamment des effets cascade, afin d'établir les situations les pires, les paramètres influents (heures, période, contexte, nature de l'acte) et les ruptures de service associées. Connaître les seuils (période critique de la journée, combinaison d'infrastructures la plus impactante en termes de gravité) et les zones d'impacts associées, c'est déjà améliorer la capacité d'évaluation de la gravité du scénario s'il arrive. Sur les vignettes les plus défavorables (sélection par la gravité et non par attractivité ou faisabilité), il reste alors à demander la disponibilité des services électricité et télécommunications pour vérifier une éventuelle aggravation des conséquences, ainsi qu'une détérioration des vulnérabilités et résilience du réseau technique.

Le travail réalisé pour la BSPP sur les zones de risque métier où une intervention sur feu nécessiterait la coupure du linéaire de réseau exposé en est un exemple (Chapitre 3). Il s'agit d'une cartographie de zones potentiellement vulnérables (pour rappel : la profondeur des réseaux est inconnue, donc le risque est bien potentiel tant qu'il n'y a pas eu d'informations supplémentaires sur ces zones). Il est envisageable de faire tester par opérateur la combinaison des ruptures de ligne/canalisation sur ces zones, afin d'identifier celles qui pourraient mener à une coupure de courant, de gaz ou de chauffage. On obtiendrait alors une sélection des combinaisons par leur gravité (la rupture de service ici), avec un calcul potentiel des zones d'impact associées. Cependant, si l'on prend ne serait-ce que le réseau électrique, cela représente un nombre important de vignettes à considérer dans une base de données. Un très grand nombre de scénarios considérés ne peut être utilisé que via un logiciel d'aide à la décision en cas de crise, ce qui constitue une contrainte pour l'utilisation de cette méthode.

4.4 Conclusion du chapitre 4

Ce chapitre a proposé une méthode d'évaluation de la vulnérabilité et de la résilience des réseaux techniques face à des scénarios détaillés. Les notions de vulnérabilité et de résilience n'ont pas de définition consensuelle entre les différents corps de métiers. Nous avons justifié dans le chapitre 2 les définitions choisies, mais il est évident qu'il s'agit là d'une première restriction à l'usage de cette méthode. Son application repose sur un découpage entre les couches techniques et organisationnelles, et entre l'échelle d'analyse de l'infrastructure pour la vulnérabilité singulière (physique et fonctionnelle) et la prise en compte de l'ensemble du réseau (vulnérabilité systémique) et de ses réactions (capacités de résilience). Cette séparation artificielle, bien que peu intuitive au premier abord, permet d'envisager systématiquement l'ensemble des étapes d'analyse, et donc ouvre la voie vers la création d'une base de données de ces indicateurs, vignette par vignette et réseau par réseau. Par ailleurs, elle semble convenir aux opérateurs de réseaux d'eau.

Cette méthode sépare également les évaluations *a priori* et *a posteriori* des capacités de résilience. Lorsqu'une crise s'est déroulée, il est possible de reconstruire avec exactitude la courbe de performance du système et donc de savoir, en vertu de la théorie (voir chapitre 2), quelles ont été ses capacités de résilience. Lorsqu'un scénario n'est encore jamais arrivé, nous pouvons envisager de nombreuses courbes de performance en fonction du contexte du système. Il est alors plus prudent d'estimer une capacité sur la base de l'existence de moyens de réaction dimensionnés pour répondre aux objectifs théoriques, à l'aide d'un questionnaire. Une courbe des niveaux de performance obtenue par simulateurs spécifiques est pertinente uniquement jusqu'à l'implémentation de solutions palliatives par la couche organisationnelle du système (courbe de dégradation de performance associée à la capacité d'absorption passive du système). Au-delà, elle est bien trop incertaine.

Pour proposer cette courbe de performance, il est important de s'intéresser à la vulnérabilité individuelle de chaque infrastructure, tant d'un point de vue physique que d'un point de vue fonctionnel (disponibilité des services supports et sensibilité aux effets cascade) face à ce scénario détaillé. Puis il faut simuler la courbe de dégradation de cette performance dans la

Chapitre 4 : Vulnérabilité et résilience des réseaux techniques à destination des opérateurs

phase passive du système, afin de la comparer à la rapidité estimée de réaction du système (temps de détection, de décision et mise en œuvre).

Ces deux indices de vulnérabilité et de résilience permettent aux opérateurs de comparer de nombreux scénarios pour identifier ceux aux conséquences les plus graves, à l'aide d'une structure commune. Nous avons vérifié à travers les neuf cas d'application de la méthode sur trois réseaux réels différents qu'elle était transposable, notamment grâce à l'utilisation de seuils de performance spécifiques aux réseaux et basés sur l'aspect réglementaire et contractuel. Nous avons également vu que cet aspect réglementaire permettait d'étendre l'application à d'autres réseaux (électricité par exemple), mais que l'absence de seuils de performance/défaillance lors du retour à la normale limitait actuellement une application à certains autres réseaux. La définition de ces seuils n'est pas anodine, elle implique une mise en adéquation des moyens de réaction des opérateurs de réseaux. Cependant ces seuils constituent des indicateurs d'aide à la décision qu'il pourrait être utile par ailleurs de définir pour la planification ou la gestion de crise (aide à la priorisation par exemple).

Cette méthode demande l'identification par vignette des services supports défaillants extérieurs au réseau considéré. C'est lors de cette demande que l'on peut voir la complémentarité entre la modélisation des effets cascade par couplage faible (§3.5) et l'évaluation de la vulnérabilité et de la résilience des réseaux techniques. Nous avons vu précédemment qu'il pouvait y avoir un nombre très important de vignettes (instance détaillée de scénario) à étudier par opérateur. Pour qu'une application de cette méthode puisse être envisagée, il est donc nécessaire de sélectionner les scénarios et de les mutualiser dans une base de données avant de les soumettre aux différents opérateurs des services supports.

Cette base de données doit donc être structurée (voir la section 3.1). Il est plus facile d'envisager en première approche cette méthode sur des scénarios (donc des vignettes) soit dont la zone d'impact directe est déjà estimée (crue par exemple), soit dont l'étude peut se faire de façon déterministe (voir la section 3.2 sur les risques métier BSPP). Il est également nécessaire d'étendre ensuite cette méthode aux vignettes d'actes malveillants que craignent les gestionnaires de réseaux, en les classant dans un premier temps sur la base de leur probabilité d'occurrence (la comparaison des vignettes par la gravité peut se faire dans un second temps, une fois les effets cascade modélisés, voir la section §3.6 sur l'évaluation des conséquences).

La sélection des scénarios est une limite de l'approche. En effet, comme la méthode s'appuie sur la modélisation des effets cascade telle que présentée dans la section 3.5, cela limite son application aux scénarios étudiés. Or, les scénarios qui intéressent chaque opérateur ne concernent pas forcément l'ensemble des autres opérateurs, et l'étude systématique de tous les opérateurs est une démarche lourde à mettre en place. C'est pourquoi l'application de cette méthode nécessite de limiter l'étude des effets cascade aux réseaux les plus influents (voir paragraphe 3.5.4) pour augmenter sa faisabilité. Les réseaux électriques et les réseaux de télécommunications ont une dynamique de dégradation plus rapide que les autres réseaux, et ont également un fort pouvoir impactant. Il paraît donc pertinent de leur demander en priorité

Chapitre 4 : Vulnérabilité et résilience des réseaux techniques à destination des opérateurs

s'ils envisagent une rupture de leur service sur chaque vignette. Les autres opérateurs de réseaux techniques pourront être également consultés dans une deuxième phase si la qualité du résultat l'exige.

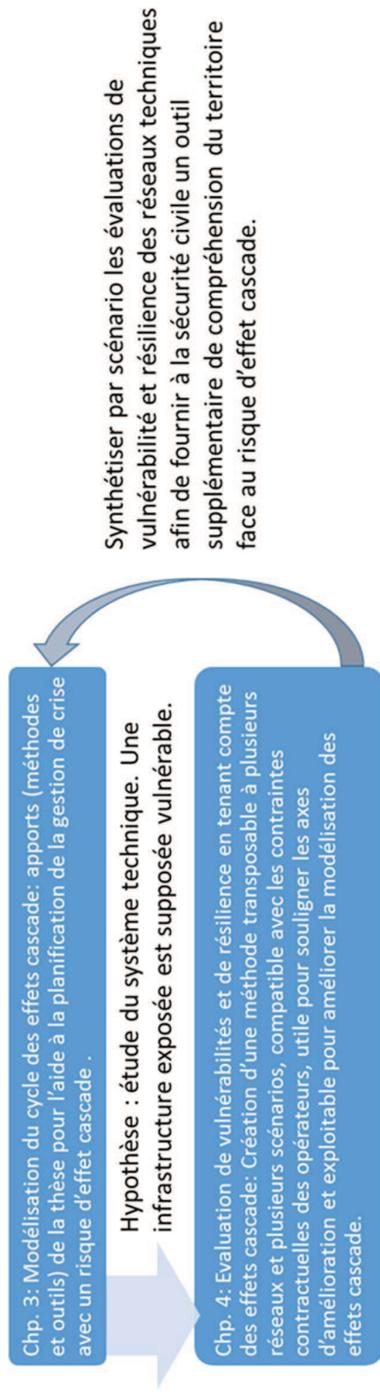
Les gestionnaires de réseaux électriques ou de télécommunications peuvent plus facilement fournir une cartographie des zones de rupture de service par vignette plutôt qu'étudier au cas par cas l'ensemble des infrastructures des différents réseaux (ce qui supposerait par ailleurs de leur fournir cette liste). L'utilisation des zones d'impact telles que définies au chapitre 3 permet aux gestionnaires des autres réseaux techniques de tirer leurs conclusions en autonomie. La méthode propose donc de calculer les indicateurs de vulnérabilité et de résilience des réseaux face au couple {vignette, zones d'impact}. On obtient alors une évaluation de la vulnérabilité qui inclut les effets cascade de la défaillance du réseau électrique, de télécommunications et des autres réseaux consultés (avantage fort), mais qui ne tient pas compte des boucles de rétroaction (limite de la méthode).

Les gestionnaires des réseaux électriques et de télécommunications – entre autres – pourraient également fournir une courbe de défaillance par vignette. Mais cela ne serait pas interprétable par les autres réseaux sans la localisation des pertes de service. Cela implique deux conclusions.

- La courbe de performance n'est utile que pour la production des indicateurs de vulnérabilité et de résilience.
- La modélisation des effets cascade par couplage faible des zones d'impact est au service de l'analyse de la vulnérabilité et de la résilience.

Or, nous avons vu dans le chapitre 3 que la connaissance de la vulnérabilité de chaque infrastructure face à l'indisponibilité des ressources support et la résilience du système permettait de mieux qualifier les scénarios d'effets cascade. Les notions de vulnérabilité, résilience et effets cascade sont donc bien liées et doivent être étudiées de façon concordante. La figure ci-dessous résume les apports du chapitre 4 et ce lien vers les méthodes développées dans le chapitre 3.

Le choix des vignettes est un point qui conditionne l'intérêt de cette approche. Concernant les scénarios dont les zones d'impact sont estimées (crues), il est intéressant d'aller à un niveau de précision plus grand sur la connaissance des effets cascade, des vulnérabilités et de la résilience des différents acteurs. Cela passe notamment par l'organisation d'exercices, comme Sequana pour la crue centennale en Île-de-France. Les méthodes précédentes de modélisation des effets cascade et analyse de vulnérabilité et résilience sont complémentaires de ces exercices, car il n'est pas possible de s'entraîner sur l'ensemble des vignettes identifiées.



Etude des réseaux techniques comme système sociotechnique, face à un scénario caractérisé en intensité et en localisation :

- Identification de moments clés, au cours d'une crise, où comparer la performance du système avec les seuils contractuels et les seuils de défaillance pour l'évaluation de la résilience (deux seuils, trois niveaux: normal, dégradé, défaillant).
- Analyse des vulnérabilités matérielles et fonctionnelles (c'est à dire face à la rupture de service support, cf effets cascade) à l'échelle des infrastructures exposées au scénario. Puis analyse de la vulnérabilité à l'échelle du système, en simulant la courbe de performance du réseau en tenant compte des infrastructures défaillantes.
- Distinction de l'évaluation de la résilience *a posteriori* (courbe de performance constatée, comparaison avec les seuils possible aux moments clés) et de la résilience *a priori* (avant le scénario. La courbe de performance est trop incertaine au vu des variations d'actions possibles. L'auteur propose alors d'évaluer la cohérence des ressources et procédures avec les objectifs de performance de l'entreprise, aux même moments clés que pour la résilience *a posteriori*).
- Une application sur un cas simple d'illustration. Neuf applications sur trois réseaux d'eau réels (Strasbourg, Ile-de-France, Berlin) dans le cadre du projet RESIWATER. Ces cas sont présentés mais les résultats ne sont pas communiqués pour des raisons de sécurité. Ils apportent la preuve que cette méthode est applicable à plusieurs scénarios et plusieurs réseaux d'eau différents.
- Discussion sur la faisabilité de la transposition de la méthode à d'autres réseaux techniques.

Figure 76 : Apports du chapitre 4 et complémentarité des résultats avec le chapitre 3

5 Discussion générale et conclusion

Les effets cascade, l'évaluation de la vulnérabilité et de la résilience, la planification et la gestion de crise sont quatre domaines liés lorsque l'on parle de réseaux techniques vitaux. L'effet cascade est défini dans ce travail comme « la défaillance d'une infrastructure qui cause la défaillance d'un élément d'une seconde infrastructure, provoquant ainsi sa défaillance » [Rinaldi, 2001]. Il faut distinguer les effets cascade internes, entre les infrastructures d'un réseau donné, et les effets cascade externes lorsqu'ils touchent un autre réseau que celui initialement impacté. Ce travail définit la vulnérabilité d'un système comme la « perte de performance du système mesurée à la fin de la réaction passive de celui-ci face à un aléa caractérisé en intensité et en localisation ». Il distingue pour cela une vulnérabilité physique (dommages) et une vulnérabilité fonctionnelle (vis-à-vis de la perte de service des autres réseaux dont il est dépendant) des infrastructures qui composent le système d'étude. La résilience est, elle, définie comme la capacité du système sociotechnique à absorber un choc, à s'adapter face à celui-ci et à retrouver sa performance contractuelle dans un délai acceptable.

Le double questionnement de ce travail de thèse se positionne vis-à-vis des besoins opérationnels de la sécurité civile et des opérateurs de réseaux techniques, avec notamment en perspective le dispositif ORSEC RétaP'Réseaux : comment modéliser les effets cascade entre réseaux techniques pour mieux planifier et gérer une crise du point de vue de la coordination – la sécurité civile – et du point de vue des opérateurs de réseaux ? Comment mesurer les vulnérabilités et les résiliences des réseaux techniques face aux différents scénarios, en prenant en compte ces effets cascade ? Ces deux notions sont complémentaires et ont été abordées l'une après l'autre par des méthodes innovantes. L'enchaînement des méthodes développées dans cette thèse est résumé dans la Table 40.

Avant d'étudier à proprement parler les effets cascade, ce travail a commencé par analyser plus particulièrement une cause d'effet cascade liée aux activités de la sécurité civile. L'intervention des sapeurs-pompiers sur feu de transport à proximité de réseaux techniques dangereux nécessite dans certains cas de demander la neutralisation du réseau pour sécuriser l'intervention. Ce travail propose une méthode pour cartographier automatiquement ces zones, qui présentent un potentiel de causes d'effets cascade lorsque ces interruptions sont combinées en simultané. Cette carte, implémentée avec succès dans les systèmes d'information géographique de la Brigade de Sapeurs-Pompiers de Paris (BSPP), constitue alors un outil d'alerte du risque d'effet cascade. Elle répond par ailleurs à un second intérêt opérationnel formulé par la BSPP, à savoir identifier ces zones présentant un risque métier qui justifierait la coupure d'un réseau.

Pour la modélisation des effets cascade explorée dans le chapitre 3, nous avons fait l'hypothèse que les réseaux sont des systèmes uniquement techniques, et nous nous sommes focalisés sur la propagation rapide (quelques heures) de défaillances via des liens de dépendances géographiques, physiques et cybernétiques. La prise en compte du système

Chapitre 5 : Discussion générale et conclusion

sociotechnique est venue dans un second temps, dans le chapitre 4. Il manquait jusqu'à présent une méthode qui avait à la fois les avantages de l'approche implicite en termes d'économie de données et de refus d'entretien d'une capacité de simulation chez la sécurité civile, et les avantages de l'approche explicite en termes de flexibilité et de précision sur le nombre de scénarios couverts. Après avoir démontré la faible utilité des bases de données orientées graphe à l'échelle du service urbain puis de l'infrastructure, ce rapport a exploré une troisième voie prometteuse pour la modélisation des effets cascade.

Ce travail propose d'utiliser les zones d'impact produites par les simulateurs spécifiques des opérateurs comme lien de couplage faible entre simulateurs. A l'inverse du couplage fort, le couplage faible permet de garder les données et l'expertise de simulation chez les opérateurs de réseaux technique. Il nécessite en revanche de hiérarchiser les demandes de simulation car les analyses sont successives, et il n'y a pas de boucles de rétroaction, mais seulement des liens de dépendances. Cela est acceptable dans la mesure où certains réseaux ont un fort pouvoir d'impact avec une dynamique rapide (réseau électrique ou de télécommunications) sur les autres réseaux techniques, alors que d'autres réseaux seront plus impactés que générateurs d'effets cascade (réseau vapeur par exemple). De plus, fournir la carte des zones impactées par le scénario initial, ainsi que les zones privées des services les plus influents (électricité et télécommunications) permet déjà aux opérateurs d'utiliser en autonomie leurs simulateurs spécifiques en tenant compte des infrastructures défailantes matériellement ou fonctionnellement. Ils peuvent ainsi à leur tour communiquer leurs propres zones d'impact à la sécurité civile. Celle-ci peut alors constituer une cartographie par scénario des zones d'impact par effet cascade. L'utilisation de zones d'impact permet une autonomie dans l'analyse qui est également exploitée pour l'évaluation de la vulnérabilité et de la résilience de chaque opérateur (Table 40).

La faisabilité de cette approche innovante a été démontrée sur le scénario de coupure d'électricité autour de Saint-Nazaire entraînant un impact sur le fonctionnement du réseau d'eau. Cependant, cette cartographie des zones évolutives est influencée par les facteurs de contexte (heure de panne, durée, consommation), ce qui souligne d'autant l'importance de l'étude de la menace en amont de la démarche. De plus, il serait intéressant de compléter celle-ci par une étude sur les différences d'influence des facteurs de contexte, afin de mieux définir les catégories de scénario à étudier.

La production de zones d'impact évolutives permet de plus à la sécurité civile d'estimer de façon automatisée les conséquences des scénarios étudiés. En effet les enjeux matériels sont connus et cartographiés (institutions, écoles, entreprises, *etc.*), mais l'enjeu humain est bien souvent estimé sur la base du recensement de la population dans leur logement. Or, cette estimation n'est pas toujours valable. Pendant une journée travaillée : les scolarisés et travailleurs vont à leur lieu de travail, les commerces et établissements recevant du public se remplissent également, tout comme les lieux de transport. Ce travail propose donc une méthode d'estimation de l'évolution de la densité humaine sur plusieurs périodes.

Le dernier chapitre est consacré à l'évaluation de la vulnérabilité et de la résilience des réseaux techniques face à des aléas caractérisés, incluant dans l'analyse les effets cascade précédemment modélisés (acquisition des zones d'impact). Les réseaux sont de nouveau des systèmes sociotechniques. Les méthodes existantes de vulnérabilité sont centrées sur un risque et un réseau. De plus, peu tiennent compte des effets cascade. Il manquait alors une structure d'évaluation transposable à plusieurs réseaux et plusieurs scénarios et tenant compte des effets cascade. Ce rapport propose une réponse novatrice par la combinaison de trois points. Tout d'abord, répondre à l'aspect transposable de l'évaluation signifie utiliser un indicateur commun à l'ensemble des entreprises. Nous avons donc défini la vulnérabilité et la résilience en fonction de l'indicateur de performance de chaque système étudié. Ensuite nous avons choisi la forme du questionnaire pour garder une structure commune, tout en élaborant des questions qui obligent à considérer l'ensemble des aspects :

- de la vulnérabilité : matérielle et fonctionnelle (c'est-à-dire vis-à-vis de la rupture des services supports à l'aide des zones d'impact) à l'échelle de l'infrastructure, puis systémique avec les simulations techniques de l'évaluation du niveau de performance du réseau,
- et des capacités de résilience (absorption, adaptation et réparation) en fonction de la cohérence de la préparation et des moyens de l'entreprise face à ses propres objectifs de performance.

Troisièmement, ces questions sont basées sur les seuils estimés de performance minimale (vis-à-vis des contraintes contractuelles) et de défaillance (limite d'engagement de l'état, comme détaillé par le dispositif ORSEC RétaP Réseaux). L'aspect transposable a été vérifié par son application à neuf scénarios différents par trois gestionnaires de réseaux d'eau distincts et discutés pour une extension à d'autres réseaux techniques. Nous pouvons cependant souligner ici quatre limites. Tout d'abord le choix de l'indicateur de performance et donc des seuils associés influe forcément sur le résultat de l'évaluation. Il faut donc que ceux-ci soient définis en concertation entre les opérateurs de réseaux et la sécurité civile. Ensuite, le choix des scénarios étudiés doit correspondre à une analyse de la menace. En effet, nous avons vu lors de l'application de la méthode que certains choisissaient les scénarios dont ils avaient peur (et face auxquels ils étaient forcément vulnérables), sans pour autant justifier de l'intérêt de cette étude. De plus, le questionnaire proposé semble plus adapté aux événements initiateurs soudains (explosion, crue éclair, tremblement de terre) qu'aux scénarios avec une dynamique lente, pour lesquels la méthodologie doit encore être améliorée. Enfin, avoir accès aux zones d'impact des autres réseaux par scénario, est un processus long dans lequel, là-encore, les données ont un poids juridique et économique qui peut ralentir la coopération entre opérateurs. La sécurité civile, en tant qu'organisme neutre et public, a donc également un rôle d'intermédiaire à jouer pour favoriser une analyse de la vulnérabilité et de la résilience qui prenne en compte les effets cascade, sur les scénarios qu'elle juge prioritaire. Il peut également être nécessaire de restreindre l'analyse des effets cascade aux deux réseaux les plus impactant (électricité et télécommunications) afin d'accélérer son application aux nombreuses vignettes à étudier.

Malgré ces limites, cette méthode a également de nombreux avantages opérationnels. Ces évaluations par scénario constituent pour la sécurité civile un indicateur de compréhension

Chapitre 5 : Discussion générale et conclusion

des avantages et des faiblesses des réseaux en gestion de crise. Elles représentent également pour les gestionnaires de réseaux un moyen d'identifier les axes d'amélioration des vulnérabilités et des capacités de résilience, un outil de mesure pour suivre l'évolution de leurs réseaux face aux scénarios qui les concernent et une aide pour hiérarchiser les scénarios par leur gravité.

Le double questionnement de ce travail de thèse a été systématiquement traité avec, en perspective, les besoins opérationnels de la sécurité civile et des opérateurs de réseaux techniques. La méthode proposée pour modéliser les effets cascade est une méthode innovante qui respecte les contraintes de données et de simulation identifiées pour la sécurité civile. La méthode d'analyse de la vulnérabilité et de la résilience est bien une méthode transposable, et elle est accordée sur les contraintes contractuelles des opérateurs de réseaux techniques. La modélisation des effets cascades et des zones d'impact associées permet à l'analyse de la vulnérabilité et de la résilience d'intégrer la vulnérabilité fonctionnelle (rupture de service support) dans l'évaluation. La production d'indicateurs de vulnérabilité et de résilience permet à la sécurité civile de connaître les points forts et faibles de chacun, et donc de hiérarchiser les scénarios de crise à étudier en priorité. C'est alors une approche complémentaire de l'organisation d'exercice de gestion de crise (planification), car il est bien impossible de s'entraîner sur l'ensemble des scénarios identifiés. Nous avons ainsi vu à travers ce rapport à quel point les notions d'effets cascade, de vulnérabilité et de résilience sont des notions à étudier de façon complémentaire, et qu'elles ont un intérêt fort pour l'aide à la planification et à la gestion de crise.

Table 40 : Résumé des méthodes développées dans la thèse, de leurs avantages et de leurs limites

Objectif de modélisation	En planification.		En gestion de crise. SC : Sécurité Civile, GR : gestionnaires de réseaux		Conclusion de l'approche
	SC : Sécurité Civile, GR : gestionnaires de réseaux	+	-	+	
Classement des causes des Effets Cascade (EC)	Regrouper les scénarios étudiés par classe de cause.				
Approfondissement d'une cause d'EC liée aux interventions BSPP: cartographie des zones propices à cette cause	Automatisation sous logiciel SIG (ArcGIS) de cartographie des zones propices à un risque métier BSPP lié à un réseau technique. Une intervention sur feu de transport à ces endroits nécessiterait la coupure du réseau.	SC : La cause est étudiée ici de façon déterministe. Les zones dangereuses identifiées peuvent être étudiées en amont en demandant plus de détails techniques aux gestionnaires de réseaux afin de mieux qualifier le risque métier BSPP et donc le risque de coupure réseau.		SC : L'intégration de cette cartographie au moteur d'engagement des ressources de la BSPP permet d'adapter les compétences des ressources engagées face au risque métier identifié.	L'analyse des causes doit se faire une catégorie après l'autre. Pour généraliser l'étude des EC, nous nous intéresserons seulement à la défaillance d'une infrastructure comme l'évènement déclencheur d'un EC, quelle que soit la cause de la défaillance.
Modéliser les relations de dépendance à l'échelle des services urbains. Tester l'utilité de celle-ci pour la SC dans l'étude des EC.	Neo4J (outil de modélisation par base de données orientée graphe).	SC : Outil de compréhension globale de l'importance des liens et des acteurs centraux.	SC : Le manque de spatialisation des liens et le manque de précision ne permet pas de modéliser les EC de façon assez fine sur le graphe relationnel pour apporter une plus-value à la planification.	SC : Le manque de spatialisation des liens et le manque de précision ne permet pas de modéliser les EC de façon assez fine sur le graphe relationnel pour apporter une plus-value à la gestion de crise.	Il est nécessaire de modéliser les liens de dépendance à l'échelle de l'infrastructure et de transcrire les défaillances de celles-ci en termes de zones d'impact pour avoir une utilité pour la SC. Deux voies sont à explorer : soit il est possible d'attribuer par anticipation une zone d'impact fixe à la défaillance d'infrastructure, et auquel cas un graphe relationnel à l'échelle des infrastructures est possible pour la modélisation des EC ; soit il est nécessaire de s'appuyer sur les simulateurs spécifiques à chaque réseau pour calculer une zone d'impact évolutive, ce qui implique un couplage de simulateurs.
Tester la faisabilité de l'attribution par anticipation de zones d'impact fixes par infrastructure défaillante, indépendamment du scénario.	Analyse des différentes topologies des réseaux, et des infrastructures éligibles à l'approche.	SC : la constitution de la base de données {infrastructure, zone d'impact fixe associée} est un outil d'évaluation des conséquences facile à utiliser.	SC : peu d'infrastructures sont éligibles à cette approche fixe.	SC : une crise impliquant la défaillance d'une infrastructure étudiée peut tout de suite être assimilée à une estimation de conséquence.	Peu d'infrastructures sont éligibles à cette approche fixe. Il est donc nécessaire de s'appuyer sur les simulateurs spécifiques à chaque réseau pour calculer une zone d'impact évolutive, ce qui implique un couplage de simulateurs pour calculer un EC.

Objectif de modélisation	Outil de modélisation proposé dans la thèse	En planification. SC : Sécurité Civile, GR : gestionnaires de réseaux	En gestion de crise. SC : Sécurité Civile, GR : gestionnaires de réseaux	Conclusion de l'approche
Démonstration de faisabilité d'un couplage de simulateurs spécifiques, basé sur les zones d'impact. Application au couplage modèle électrique, modèle hydraulique.	Couplage faible entre les deux simulateurs spécifiques, en utilisant la zone d'impact comme lien de couplage sur un système composé de deux réseaux techniques, dont l'un est dépendant du fonctionnement de l'autre.	SC : La connaissance des cartes de propagations spatiales de défaillances par scénario permet de mieux dimensionner le besoin d'engagement de la SC et de tester la cohérence de réaction des partenaires sur ces scénarios. Seules les cartes de « zones d'impact » sont stockées à la SC. GR : Celles-ci permettent une analyse en autonomie des conséquences internes.	SC : une variation de contexte change le résultat. Il faut donc prioriser et limiter les variations de contexte (période ou jour de l'année, pics de consommation, etc.) autour d'un même scénario.	Elle valide l'utilisation de la zone d'impact comme lien, car elle permet un couplage faible (donc facile) et pertinent entre simulateurs spécifiques. L'utilité de celle-ci en planification est validée. Il est nécessaire d'avoir une BDD de scénarios pré-calculés pour avoir un événement de référence en cas de crise avec EC.
Système composé de plusieurs réseaux techniques interdépendants : Constitution d'une base de scénarios avec les zones d'impact associées.	Extension de la méthode précédente : hiérarchisation des couplages faibles selon l'influence des réseaux techniques.	Idem Il permet de modéliser les propagations par liens de dépendance.	Idem Il est plus difficile de modéliser les boucles de rétroaction.	Elle valide l'utilité en planification et en gestion de crise de l'approche. Mais l'utilisation de zones d'impact cache une partie de la compréhension des systèmes étudiés. La SC gagnerait par ailleurs à connaître les indicateurs supplémentaires de vulnérabilité et de résilience des réseaux par scénario. Ces indicateurs doivent prendre en compte la possibilité d'EC dans les scénarios.
Estimer les conséquences sociales d'une crise grâce aux zones d'impact	SIG (PostGIS +QGIS) pour représenter en statistique l'évolution de densité humaine dans la journée	SC : Elle permet de quantifier le nombre de personnes potentiellement touchées par une interruption de service et donc : 1. De hiérarchiser les scénarios par gravité –et donc distinguer les situations désagréables des vraies situations de crise 2. Dimensionner les besoins pour les plus graves. GR : Quantifier en termes de clients l'importance de leur coupure de service	SC : Posséder un événement de référence et les zones d'impact associées en cas de crise avec EC.	Cette approche a une utilité claire en planification.
Développer une évaluation d'analyse de vulnérabilité et de résilience transposable à plusieurs réseaux et scénarios et tenant compte des EC.	Questionnaire basé sur les courbes de performance des réseaux par scénario. Evaluation basée sur les seuils contractuels de performance et de défaillance.	SC : Identifier par scénario les infrastructures vulnérables (directement ou par EC), et les axes d'amélioration de la résilience. Créer un indicateur de suivi des vulnérabilités et résilience compatible avec les exigences contractuelles. SC : Mieux appréhender les points forts et faibles des réseaux par scénario.	SC : la méthode donne une référence de situation et non une prévision d'évolution de la situation de crise	L'approche donne aux GR un outil de suivi compatible avec leurs contraintes. Le côté transposable leur permet d'analyser les différents scénarios par une même structure. Pour la SC, cela permet d'avoir les points forts et faibles des différents GR par scénario, et donc d'orienter le choix des scénarios à améliorer.

6 Bibliographie

[Adachi, 2008] Adachi T., Ellingwood, B. (2008). Serviceability of earthquake-damaged water systems: Effects of electrical power availability and power backup systems on system vulnerability. *Reliability Engineering and System Safety* 93 (Eds. Elsevier Ltd) p.78–88.

[Alsubaie, 2015] Alsubaie A., Alutaibi K., Marti, J. (2015). Resilience assessment of interdependent critical infrastructure. *Critical Information Infrastructures Security. 10th International Conference, CRITIS, 2015, Berlin, Germany, October 5-7, 2015, Revised Selected Papers.* (Springer. Eds.: Rome, Theocharidou, Wolthusen). p.43-56.

[ANR, RESIWATER, 2015] Agence Nationale de la Recherche (2015). Présentation du projet RESIWATER Innovative Secure Sensor Networks and Model-based Assessment Tools for Increased Resilience of Water Infrastructures. <http://www.agencenationalerecherche.fr/?Project=ANR14PICS0003> *Site Web*, consulté le 29/08/2016.

[Ardouin, 2011] Ardouin, Congrès du gaz Paris 2011. Palais des Congrès de Paris. Atelier 2 : Quelle intelligence pour les réseaux d'énergie de demain ? *Présentation PowerPoint.* 4 p. Disponible sur http://www.congresdugaz.fr/congres2011/fr/mercredi_14_septembre.php

[Australie, 2015] Australian Government, Attorney-General's Department: "CIPMA: Critical Infrastructure Program for Modelling and Analysis", ag.gov.au. *Site Web*, consulté le 20 avril 2015. <http://www.ag.gov.au/NationalSecurity/InfrastructureResilience/Pages/CriticalInfrastructureProgramforModellingandAnalysisCIPMA.aspx>

[Brilhac, 2009] Brilhac J.-F., Thibaut O. (2009). Analyse des risques sur un territoire – Ebauche d'une nouvelle méthode globale. *Techniques de l'Ingénieur.* Univers : Génie Industriel, Pack : Management industriel, Base : Théorie et management des systèmes complexes. Publication le 10/04/2009. 18 p.

[Bruneau, 2003] Bruneau M., Chang S., Eguchi R., Lee G., O'Rourke T., Reinhorn A., Shinozuka M., Tierney K., Wallace W., vonWinterfeldt D. (2003). A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthquake Spectra*, Volume 19, No. 4. p. 733–752.

[BSPP 118.2, 2012] Brigade des Sapeurs Pompiers de Paris. BSP 118 Tome 2. Règles d'engagement spécifiques par type d'intervention, 2012. 104p.

[Cadini, 2008] Cadini F., Zio E., Petrescu C. (2008). Using centrality measures to rank the importance of the components of a complex network infrastructure. *Critical Information Infrastructures Security CRITIS 2008.* R. Setola and S. Geretshuber (Eds.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, LNCS 5508, p. 155–167.

[Carene, origine, 2016] Carene, Saint-Nazaire agglomération (2016). D'où vient l'eau. *Site Web*, consulté en juin 2016. <http://www.agglo-carene.fr>

[Carene, Sécurisation, 2015] Carene, Saint-Nazaire agglomération (2015). Ouvrages d'alimentation et de sécurisation en eau potable du Nord-Ouest du département de Loire-Atlantique. 3 p.

[CEPRI, 2016] Centre Européen de Prévention du Risque Inondation (2016) : Le territoire et ses réseaux techniques face au risque d'inondation. *Les guides du CEPRI*. 88 p.

[CGEDD, 2013] Conseil général de l'environnement et du développement durable, ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (2013). Vulnérabilité des réseaux d'infrastructures aux risques naturels. *Rapport du Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable n°008414-01*. 102 p.

[CGEDD, 2016] Conseil général de l'environnement et du développement durable, ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (2015). Résilience des réseaux dans le champ du MEDDE à l'égard des risques. Etude des conditions de retour à la normale après une situation de crise affectant des grands réseaux. *Rapport n° 008414-03* établi par Yvan AUJOLLET, Philippe BELLEC, Thierry GALIBERT, Gérard LEHOUX, Jean-Michel NATAF et Laurent WINTER. 144 p.

[CIPRNet D7.6, 2016] ENEA - Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development (2016). D7.6 Integration of meteo-climatological simulators, flood forecasts, earthquakes data and analysis tool and Interface to the technical demonstrator for federated CIP MS&A. Critical Infrastructure Preparedness and Resilience Research Network (CIPRNet). FP7 Grant agreement no: 312450. Version date: 2016-02-29. 34 p.

[CIPRNet, D7.2 et D7.3, 2015] ENEA - Italian national agency for new technologies, energy and sustainable economic development (2015). D7.2 + D7.3 Database of the DSS with consequence analysis and assessment and selection of vulnerability and risk estimators. Critical Infrastructure Preparedness and Resilience Research Network (CIPRNet). FP7 Grant agreement no: 312450. Version date: 2015-05-06. 76 p.

[CIPRNet, D7.4, 2015] ENEA - Italian national agency for new technologies, energy and sustainable economic development (2015). D7.4 Implementation of the DSS with consequence analysis. Critical Infrastructure Preparedness and Resilience Research Network (CIPRNet). FP7 Grant agreement no: 312450. Version date: 2015-07-28. 50 p.

[CMVOA, 2009] Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire (2009). Centre Ministériel de Veille Opérationnelle et d'Alerte, Secrétariat général, Service de défense, de sécurité et d'intelligence économique. Avril 2009. 4 p.

[CRE, gaz, 2016] Commission de régulation de l'énergie (2016). Infrastructures gazières, description générale. *Site Web*, consulté en avril 2016. <http://www.cre.fr/reseaux/infrastructures-gazieres/description-generale>

[CRE, Services Systèmes, 2016] Commission de régulation de l'énergie (2016). Services système et mécanisme d'ajustement. *Site Web*, consulté en avril 2016. <http://www.cre.fr/reseaux/reseaux-publics-d-electricite/services-systeme-et-mecanisme-d-ajustement>

[CRP, 2015] CENTRE RISQUE & PERFORMANCE, École Polytechnique de Montréal : «Un nouveau projet pour le CRP en lien avec le développement et le transfert technologique de l'outil Domino », *Actualités*. 2015. *Site Web*, consulté le 7 May 2015. <http://www.polymtl.ca/crp/nouvelle/index.php#nouv2>

[Dassens, 2008] Dassens A., Launay R. (2008). Etude systémique de l'analyse de risques – Présentation d'une approche globale. *Techniques de l'Ingénieur*. Univers : Génie Industriel, Pack : Management industriel, Base : Théorie et management des systèmes complexes. Publication le 10/07/2008. 23 p.

[Dautun, 2007] Dautun C. (2007). Contribution à l'étude des crises de grande ampleur : connaissance et aide à la décision pour la sécurité civile. *Thèse de doctorat*. École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne. HAL Id: tel-00803754 <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00803754> 415 p.

[DECLARATION D'INTENTION, 2016] Projet de déclaration d'intention conclue entre : monsieur le préfet de la région d'Île-de-france, préfet de Paris, monsieur le préfet de police de Paris, préfet de la zone de sécurité et de défense de paris, les concepteurs et opérateurs de réseau suivants : ErDF, RTE, GrDF, GRT gaz, RATP, SNCF, RFF, SGP, Eau de Paris, SIAAP, Veolia Eau, Lyonnaise des eaux, Orange, SFR, Bouygues Telecom & Les collectivités suivantes : la Ville de Paris, les conseils départementaux des Hauts-de-Seine, Seine-Saint-Denis et Val de Marne, le STIF, le SEDIF, l'EPTB Seine Grands Lacs et Entente Oise Aisne et le SMSO (2016). Document de travail, 2 p.

[DEMOCRITE, 2013] Lapébie, E. (2013) : DEMonstrateur d'un MOteur de Couverture des RISques sur un TErritoire. Présentation du projet, ANR, 2013. 44 p.

[DEMOCRITE, Sina Bony, 2016] Sina J., Bony A. (2015) Livrable n°1 : Extension des approches vulnérabilité humaine et fonctionnelle. 150531-DEMOCRITE-ARMINES-Livrable-01-01. 101p.

[DIESIS, 2010] Consortium DIESIS, EU FP7 Project DIESIS, RI212830 (2010). Final Report: Design of an Interoperable European federated Simulation network for critical InfraStructures. Version 3. 23p.

[DIRECTIVE EU, 2008] 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. *Journal officiel de l'Union européenne*. L 345/75-81, 8 p.

[DOW CIPRNet, 2012] Critical Infrastructure Preparedness and Resilience Research Network (2012): Annex 1: Description of Work. THEME [SEC-2012.7.4-2] Networking of researchers for a high level multi-organisational and cross-border collaboration - Network of Excellence. Grant agreement no: 312450. Version date: 2012-10-10. 157 p.

[DOW PREDICT 2013] PREparing for the Domino effect in Crisis siTuations (2013). Annex 1: Description of work. THEME [SEC-2013.4.1-2] Better understanding of the cascading effect in crisis situations in order to improve future response and preparedness and contribute to lower damages and other unfortunate consequences – Capability project. Grant agreement no: 607697. Version date: 2013-10-18. 191 p.

[Dueñas-Osorio, 2009] Dueñas-Osorio L., Vemuru S. M. (2009). Cascading failures in complex infrastructure systems. *Structural Safety* 3.1 p. 157–167.

[Dutozia, 2013] Dutozia, J. (2013). Espaces à enjeux et effets de réseaux dans les systèmes de risques. *Thèse de doctorat*. UNIVERSITÉ DE NICE-SOPHIA ANTIPOLIS, UFR « Espaces & cultures », École Doctorale « Lettres, Sciences Humaines et Sociales », Laboratoire ESPACE – UMR 7300. 314 p.

[EDF, 1994] STE d'EDF GDF services (1994). Plan de Protection des Réseaux HTA B. 61-21, Principes. *Guide Technique de la Distribution d'Électricité*. 108 p.

[ERDF, 2016] ERDF (2016). Linky, le compteur communicant d'ERDF. *Site Web*, consulté en mai 2016 à l'adresse : <http://www.erdf.fr/linky-le-compteur-communicant-derdf>

[EU inondation, 2007] Journal officiel de l'Union européenne (2007). 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'inondations. *JO L 288 du 6.11.2007*. p. 27-34.

[EURIDICE, 2016] Euridice : Equipe de recherche sur les risques, dispositifs de gestion de crise et des événements majeurs. Coordinatrice : Valérie November, Ecole des Ponts Paris Tech (2016) : Charte de l'Observateur de l'exercice EU-Sequana. 2 p.

[Eusgeld, 2008] Eusgeld I., Henzi D., Kröger, W. (2008). Comparative evaluation of modeling and simulation techniques for interdependent critical infrastructures. Schutz kritischer Infrastrukturen Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BABS), Laboratorium für Sicherheitsanalytik. 50 p.

[FloodProbe, 2013] Escarameia, Stone, Project FloodProBE (2013). Technologies for flood protection of the built environment. Guidance based on findings from the EU-funded project FloodProBE. Report Number WP05-01-13-03. FP7 Grant Agreement No: 243401. Version date 2013-10-22.130 p.

[Foglietta, 2015] Foglietta C., Palazzo C., Santini R., Panzieri S. (2015). Assessing Cyber Risk Using the CISIApro Simulator. *Critical Infrastructure Protection IX* Volume 466 of the series IFIP Advances in Information and Communication Technology (Eds.: Rice, M., Sheno, S.). p. 315-331.

[FRA, 2005] Federal Railroad Administration. Washington, D.C. (2005-11). Report To Congress: Baltimore's Railroad Network, Challenges and Alternatives. Main Report: Challenges. 78 p.

[FRANCIS, 2014] Francis R., Bekera B. (2014). A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems. *Reliability Engineering and System Safety* 121. p.90–103.

[Gaetano, 2013] Gaetano, F.; Oliva, G.; Panzieri, S.; Romani, C. & Setola, R. (2013). Critical information infrastructures security. *8th International Conference, CRITIS, 2013*, Amsterdam, The Netherlands, September 16-18, 2013, Revised Selected papers. (Springer. Eds.: LUIIJF, E. & HARTEL). p.62-73.

[Gibbs, 2013] Gibbs, L. I. et Holloway, C. F. (2013) Hurricane Sandy After Action, Report and Recommendations to Mayor Michael R. Bloomberg, New-York City.

[Gleyze, 2005] Gleyze, P. (2005). La vulnérabilité structurelle des réseaux de transport dans un contexte de risque. *Thèse de doctorat*. Université Paris 7 – Denis Diderot UFR Géographie, Histoire, Sciences de la Société UMR 8504 Géographie-Cités. 540 p.

[Gleyze, 2007] Gleyze J.-F., Reghezza M. (2007). La vulnérabilité structurelle comme outil de compréhension des mécanismes d'endommagement. *Géocarrefour vol. 82/1-2*. Thème : risque : de la recherche à la gestion territorialisée. 11 p.

[Grangeat, 2016, a] Grangeat A. Brill F., Raclot S., Lapebie E. (2016). Mapping of areas presenting specific risks linked to buried technical networks for firefighters. *International journal of Information Systems for Crisis Response and Management (IJISCRAM) Volume 9, Special Issue On: Information Systems for Crisis Response and Management*. (Eds.:Tapia, Antunes, Bañuls, Moore and Porto). IGI-global. 15p.

[Grangeat, 2016, a*] Grangeat A. Brill F., Raclot S., Lapebie E. (2016). Mapping of areas presenting specific risks linked to buried technical networks for firefighters. *Proceedings of the ISCRAM 2016 Conference, International Conference on Information Systems for Crisis Response*. Rio de Janeiro, Brazil, May 2016. Eds.:Tapia, Antunes, Bañuls, Moore & Porto 8p.

[Grangeat, 2016,b] Grangeat, A. Sina J. Rosato V. Bony, A., Theocharidou M. (2016) Human vulnerability mapping facing critical service disruptions for crisis managers. Article accepté à la conférence CRITIS (Critical Information Infrastructures Security) 2016. International Union of Railways (UIC), Paris. 12p.

[Grangeat, 2015] Grangeat, A. (2015) Effets escalades entre réseaux techniques : acteurs, scénarios et données. *Présentation Power Point* du 06/01/2015 à la Zone de Défense et de Sécurité de Paris. 14 p.

[Grangeat, 2015, b] Grangeat, A. (2015) Identification des zones sensibles aux risques métiers liés aux réseaux techniques. Démarche automatique de recensement sous SIG. *Présentation Power Point* du 18/11/2015 aux rencontres territoriales de l'information géographique en SDIS (Service Départemental d'Incendie et de Secours) au CNFPT-INSET Dunkerque. 22p.

[Grangeat, 2015, c] Grangeat, A. (2015) Modélisation des vulnérabilités des réseaux sous SIG. Résultats de la tâche 6.2 du projet DEMOCRITE. *Présentation Power Point* du 06/03/2015 pour la réunion plénière DEMOCRITE, locaux de la Police à Paris. 9p.

[Grangeat, 2015, d] Grangeat, A. (2015) Modélisation des vulnérabilités structurelles et fonctionnelles des réseaux sous SIG. *Présentation Power Point* du 30/01/2015 au CEA le Ponant (Paris). 20p.

[Grangeat, 2015, e] Grangeat, A. (2015) Modélisation spatiale des impacts de défaillances réseaux sur la société. Revue d'outils existants. *Présentation Power Point* du 28/04/2015 à la Zone de Défense et de Sécurité de Paris. 18p.

[Grangeat, 2015, f] Grangeat, A. (2015) Modélisation spatiale des impacts de défaillances réseaux sur la société. Revue d'outils existants. *Présentation Power Point* du 19/05/2015 à l'Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris. 18p.

[Grangeat, 2015, g] Grangeat, A. (2015) The Challenge Of Critical Infrastructure Dependency Modelling And Simulation For Emergency Management And Decision Making By The Civil Security Authorities. *Présentation Power Point* du 07/10/2015 à la conférence internationale CRITIS (Critical Information Infrastructures Security)

[Grangeat, 2016, c] Grangeat, A. (2016) The Challenges Of Critical Infrastructure Dependency Modelling And Simulation For Emergency Management And Decision Making By The Civil Safety Authorities. *Présentation invitée. Présentation Power Point* du 09/06/2016 à la conférence finale du projet EUCONCIP European Cooperation Network on Critical Infrastructure Protection, Bruxelles (Belgique). 26p.

[Grangeat, 2016, d] Grangeat, A. Bony, A., Lapebie E., Eid M., Dusserre G. (2016) The Challenges Of Critical Infrastructure Dependency Modelling And Simulation For Emergency Management And Decision Making By The Civil Safety Authorities. *Proceedings of the final conference of the EUCONCIP project (European Cooperation Network on Critical Infrastructure Protection)*. Brussels, Belgique, June 2016. 6p. Accepté dans une édition spéciale de l'*International Journal of Critical Infrastructure Protection* à paraître en 2016.

[Grangeat, 2016, e] Grangeat, A. Brill F., Raclot S., Lapebie E. (2016) Mapping of areas presenting specific risks to firefighters due to buried technical networks. *Présentation Power Point* du 23/05/2016 à la conférence internationale ISCRAM Information Systems for Crisis Response, Rio de Janeiro (Brésil).

[Grangeat, 2016, f] Grangeat, A. Lapebie E. (2016) Vulnerability and Resilience. The Semantic Battle... *Présentation Power Point* du 03/02/2016 à Cestas, réunion RESIWATER. 26p.

[Grangeat, 2016, g] Grangeat, A. Sina J. Rosato V. Bony, A., Theocharidou M. (2016) Human vulnerability mapping facing critical service disruptions for crisis managers. *11th International Conference CRITIS (Critical Information Infrastructures Security)*, October 2016, Paris. International Union of Railways (UIC). 12p.

[Grangeat, 2015, h] Grangeat, A., Bony, A., Lapebie E., Eid M., Dusserre G. (2015) The Challenge Of Critical Infrastructure Dependency Modelling And Simulation For Emergency Management And Decision Making By The Civil Security Authorities. *10th International Conference, CRITIS, 2015, Berlin, Germany, October 5-7, 2015, Revised Selected Papers*. (Springer. Eds.: Rome, Theocharidou, Wolthusen). p 255-259.

[Grangeat, CIPRNET Staff Exchange, 2014] Grangeat, A. (Septembre 2014). Staff Exchange visit report of Amélie Grangeat (CEA) at Joint Research Center, Institute for the Protection and Security of the Citizen (Ispra, Italy) on vulnerabilities indicators. Exchange financed by the Critical Infrastructure Preparedness and Resilience Research Network (CIPRNet) project. FP7 Grant agreement no: 312450. 6 p.

[Grangeat, CIPRNET Staff Exchange, 2016] Grangeat, A. (February 2016). Staff Exchange visit report of Amélie Grangeat (CEA) at ENEA on the CIPRNet tool. Exchange financed by

the Critical Infrastructure Preparedness and Resilience Research Network (CIPRNet) project. FP7 Grant agreement no: 312450. 10 p.

[Grangeat, DEMOCRITE, cartes, 2015] Grangeat A. (2015). Cartes statiques des risques métiers liés à la présence de réseaux techniques. *Livrable DEMOCRITE*. 44 p.

[Grangeat, DEMOCRITE, méthode, 2015] Grangeat A. (2015). Description des toolboxes ArcGIS permettant de réaliser les cartes statiques des risques métiers liés à la présence de réseaux techniques. *Livrable DEMOCRITE*. 32 p.

[Grangeat, DEMOCRITE, Neo4J, 2015] Grangeat, A. (2015). Modélisation de dépendances générales entre services urbains avec le logiciel NEO4J. *Livrable DEMOCRITE*. 28 p.

[Grangeat, RESIWATER, 2016] Sedehizade F., Grangeat A., Lapebie E., Baruthio M., Weber J.M., Wery C., Piller O., Rulleau B., Feliers, C., Parisini F. (2016). Deliverable 1.1 Specification of use cases. WP1 & WP5 Use Case Specification, Investigation and Vulnerability Assessments & Development of Tools for Assessing WDS Vulnerability, Resilience and Robustness and Decision Support for Design. RESIWATER (ANR-14-PICS-0003). 25/06/2016. 110p.

[Grangeat2016, h] Wery C., Rulleau, B., Carladous, S., Grangeat A., Lapebie E., Joalland O., Piller O. et Tacnet J.-M. (2016). Risque, vulnérabilité, résilience : quels apports pour la gestion patrimoniale des ouvrages de protection et des réseaux urbains ? *Sciences Eaux & Territoires* n° 20 – 2016. P.8-13.

[Grangeat, GRDF, Observation Sequana 17/03/2016] Grangeat, 17/03/2016. Observation de GRDF dans le cadre du projet Euridice autour de l'exercice Sequana 2016. *Compte rendu*.

[Grangeat, Eaux, Observation Sequana, 2016] Grangeat, 18/03/2016. Observation des réseaux d'eau dans le cadre du projet Euridice autour de l'exercice Sequana 2016. *Compte rendu*.

[Grangeat, Orange, Observation Sequana, 2016] Grangeat, 07-11/03/2016. Observation d'Orange dans le cadre du projet Euridice autour de l'exercice Sequana 2016. *Compte rendu*.

[Grangeat, ERDF, Observation Sequana, 2016] Grangeat, 07-11/03/2016. Observation d'ERDF dans le cadre du projet Euridice autour de l'exercice Sequana 2016. *Compte rendu*.

[GRDF, 2015] Gaz Réseau Distribution France. Catalogue des prestations annexes proposées par GRDF version du 1er juillet 2015. 65 p.

[Halfaya, 2012] Halfaya F. Z., Bensaïbi M., Davenne L. (2012). Vulnerability assessment of water supply network. *Energy Procedia* 18 (Eds. Elsevier Ltd) p.772 – 783.

[Haraguchi, 2014] Haraguchi, M. & Kim, S. (2014) Critical Infrastructure Systems: A Case Study of the Interconnectedness of Risks Posed by Hurricane Sandy for New York City. Input paper prepared for the Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2015, Columbia Water Center, the Earth Institute, Columbia University for the UNISDR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction). 16p.

[Hines, 2011] Hines P., Cotilla-Sanchez E., Blumsack S. (2011) Topological models and critical slowing down: two approaches to power system blackout risk analysis. *Proceedings of the 44th Hawaii International Conference on System Sciences – 2011*. 10 p.

[IGI 66600, 2014] Direction Protection et Sécurité de l'Etat, Secrétariat General De La Défense Et De La Sécurité Nationale, Premier ministre (2014). Instruction générale interministérielle relative à la sécurité des activités d'importance vitale N°6600/SGDSN/PSE/PSN du 7 janvier 2014. N° NOR : PRMD1400503J

[IGN, BDTOPO, 2015] Institut national de l'information géographique et forestière (2015). BDTOPO ®V2.1. Descriptif de contenu. Révisé en septembre 2015. 204 p.

[IGN, GEOFLA, 2015] Institut national de l'information géographique et forestière (2015). GEOFLA ® V2.1. Descriptif de contenu. Révisé en décembre 2015. 23 p.

[InfoReseaux, NRA, 2009]InfoReseaux (2009). Hiérarchie des systèmes d'auto-commutation – RTC France Télécom. *Site Web*, consulté en avril 2016. <http://www.infos-reseaux.com/photos/image/62-recapitulatif-des-classes-de-commutation>

[InfoReseaux, Télécom, 2011] Lacombe F. (2011). Architecture de la BL France Telecom. *Site Web*, consulté en avril 2016. <http://www.infos-reseaux.com/index.php?action=articles&id=1>

[ISO 73, 2009] AFNOR (décembre 2009). FD ISO GUIDE 73. Management du risque Vocabulaire. Indice de classement : X 50-251, ICS : 01.040.03 ; 03.100.01. *Site Web*, consulté en juin 2016 <http://sagaweb.afnor.org/fr-FR/splus/Consultation/Xml/1284503/?lng=BI&supNumDos=FA156519>

[JO, 2006] Arrêté du 2 juin 2006 fixant la liste des secteurs d'activités d'importance vitale et désignant les ministres coordonateurs desdits secteurs. *Journal officiel de la République française* n°129 du 4 juin 2006 page 8502.

[JO, 2008] Arrêté du 3 juillet 2008 portant modification de l'arrêté du 2 juin 2006 fixant la liste des secteurs d'activités d'importance vitale et désignant les ministres coordonateurs desdits secteurs. *Journal Officiel de la République Française* n°156 du 5 juillet 2008 p.10823.

[Johansson, 2010] Johansson, J. (2010). Risk and vulnerability analysis of interdependent technical infrastructures addressing socio-technical systems. *Doctoral Thesis in Industrial Automation, Department of Measurement Technology and Industrial Electrical Engineering*. Lund University. 189 p.

[Kröger, 2011, Chapter 1] Kröger W, Zio E. (2011). Vulnerable Systems. Chapter 1 Introduction and definition of key terms. Springer-Verlag London Limited 2011. pp. 1-7.

[Kunz, 2013] Kunz, M.; Mühr, B.; Kunz-Plapp, T.; Daniell, J. E.; Khazai, B.; Wenzel, F.; Vannieuwenhuysse, M.; Comes, T.; Elmer, F.; Schröter, K.; Fohringer, J.; Münzberg, T.; Lucas, C. & Zschau, J.: Investigation of superstorm Sandy 2012 in a multi-disciplinary approach. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13 (2013), pp. 2579–2598.

[Lew, 2011] Lew, H. (2011). CIPMA: Critical Infrastructure Protection Modelling and Analysis, Australian Government, Attorney-General's Department National Critical Infrastructure Capability Branch National Security Capability Development Division, 1. Sept. 2011. *Présentation PowerPoint*. 20p.

[Lhomme, 2012] 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. *Thèse de doctorat*. UNIVERSITE PARIS DIDEROT Ecole doctorale Economies, Espaces, Sociétés, Civilisation : Pensée Critique, Politique et Pratiques sociales – ED 382. 375 p.

[Liu, 2012] Liu C., Tan C., Fang Y., Lok, T. (2012). The security risk assessment methodology. *International Symposium on Safety Science and Engineering in China, 2012 (ISSSE-2012)* Procedia Engineering 43, (Eds Elsevier Ltd.). pp.600 – 609.

[Marti, 2014] MARTI, J. (2014). Hybrid engineering/phenomenological approach to simulate a system of systems. *Modelling, Simulation and Analysis of Critical Infrastructures Master Class* (Edition1) UIC Headquarters –Paris (France) –24-25 April 2014.

[Michel-Kerjan, 2002] Michel-Kerjan E. (2002). Risques catastrophiques et réseaux vitaux : de nouvelles vulnérabilités. *Flux – Cahiers Scientifiques Internationaux Réseaux et Territoires*. 20 p.

[MSS, 2007] Ministère de la santé et des solidarités (2007). Les systèmes d'alimentation en eau potable - Évaluer leur vulnérabilité (Éditions Dicom). 106 p.

[MTA, 2012] Metropolitan Transportation Authority (2012). MTA River Crossings Damaged by Sandy. Superstorm Sandy: one year later. *Site Web*, consulté en 2014. http://web.mta.info/sandy/river_crossings.htm

[NORD, 2015] Zone de défense et de Sécurité Nord (2015). Sécurité civile. *Site Web*, consulté le 25/05/2015 (Mis à jour le 07/05/2015) <http://www.nord.gouv.fr/Politiques-publiques/Securite/Securite-civile>

[NTSB, 2001] National Transportation Safety Board Washington, D.C. 20594. (2001). Railroad Accident Brief. NTSB/RAB-04/08. 28 p.

[OCDE, 2014] Organisation pour la Coopération et le Développement Economique, Direction de la Gouvernance Publique et du Développement Territorial (2014) : Revue de l'OCDE sur la Gestion du Risque d'Inondation de la Seine en Île-de-France. 215 p.

[ORANGE, 2016] ORANGE (2016). FTTH. *Site Web*, consulté en avril 2016. <http://www.orange.com/fr/Collectivites/Cartes-de-couverture-et-reseaux/Reseaux-d-Initiative-Publique/Reseaux-d-Initiative-Publique/nos-solutions/FTTH>

[ORSEC RétaP'Réseaux, 2015] Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion des Crises, Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, Ministère des affaires sociales, de la santé et des droits des femmes, Ministère de l'intérieur, Ministère de l'économie, de l'industrie et du numérique (2015) : Guide ORSEC Départemental et Zonal,

Mode d'action. Rétablissement et approvisionnement d'urgence des réseaux électricité, communications électroniques, eau, gaz, hydrocarbures. *Guide G5*. 42 p.

[ORSEC, 2007] Direction de la sécurité civile, Ministère de l'Intérieur, de l'Outre-Mer et des Collectivités territoriales (2007) : Organisation de la Réponse de la sécurité civile. 16 p.

[Ouyang, 2014] Ouyang (2014). Review on modeling and simulation of interdependent critical infrastructure systems. *Reliability Engineering and System Safety* 121. p. 43–60.

[Panzieri, 2015] Panzieri S., Palazzo C., Masucci D. (2015). Emergency management with interdependency modeling in the uranium project. *The international emergency management society 2015 annual conference*, 30 Septembre – 2 Octobre 2015, Rome, Italie. 12 p.

[Petit Robert, 2013] Le petit Robert de la langue française (2013). Dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française. Définition de « capacité », « aptitude », « compétence ». Version numérique.

[Plaquette de présentation Sequana, 2016] Préfecture de Police de Paris (2016): EU Sequana Exercice zonal de gestion de crise. Scénario de crue majeure. 58 p.

[RESIWATER Proposal, 2015] Piller, O. (2015): Joint proposal to the Franco-German call on protection of critical infrastructures: innovative secure sensor networks and model-based assessment tools for increased resilience of water infrastructures. 36 p.

[REY, 2015] Rey, B. (2015). Résilience systémique d'un territoire composé d'activités essentielles suite à une perturbation majeure - Approches systémique et spatiale. *Thèse de doctorat*. École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne. 262 p.

[Rey, 2015] Rey, B. (2015). Résilience systémique d'un territoire composé d'activités essentielles suite à une perturbation majeure - Approches systémique et spatiale. *Thèse de doctorat*. École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne. 262 p.

[Rinaldi, 2001] Rinaldi, S.; Peerenboom, J. & Kelly, T.: Identifying, understanding and analyzing critical infrastructure interdependencies. *IEEE Control Systems Magazine* 0272-1708/01 (2001), S. 11-25.

[Robert, 2007] Robert B, Morabito L. and Quenneville O. (2007) The preventive approach to risks related to interdependent infrastructures. *International Journal of Emergency Management*, Vol. 4, No. 2, S. 166-182.

[Robert, 2010] Robert, B. (2010) Organizational Resilience – Concepts and evaluation method. Centre Risque & Performance. Presses Internationales Polytechnique. Disponible sur : <http://www.polymtl.ca/crp/doc/Organizational-Resilience.pdf>

[Robert, 2013, b] Robert B, Morabito L., Cloutier I., Hémond Y. (2013) Interdependent critical infrastructures: from protection towards resilience. *Critical Infrastructure Symposium (TISP)*. 12 p.

[Robert, 2013] Robert, B.; Morabito, L. & Debernard, C.(2013). Simulation and anticipation of domino effects among critical infrastructures. *International Journal of Critical Infrastructures* Vol. 9, No. 4. p. 275-303.

[Robert, 2015] Robert, B. (2015). Modélisation des interdépendances entre systèmes essentiels (infrastructures vitales), Centre risque & performance, Polytechnique Montréal, 6. Janvier 2015. *Présentation PowerPoint* au CEA Paris (Fr).

[Romani, 2013] Romani C. (2013). CISIA: Analysis of Severe Space Weather on Critical Infrastructures. *Présentation PowerPoint. 8th International Workshop, CRITIS, 2013, Amsterdam, The Netherlands, September 16-18, 2013.*

[Rome, 2014] Rome, E. (2014). The DIESIS approach to semantically interoperable federated critical infrastructure simulation. *DIESIS Middleware Presentation 2014, Fraunhofer Institute for Intelligent Analysis and Information Systems (IAIS).*

[RTE, 2015] RTE (2015). Référentiel technique de RTE. 502 p. Disponible à l'adresse http://clients.rte-france.com/lang/fr/visiteurs/mediatheque_client/offre.jsp

[RTE, carte interactive, 2015] RTE (2016). La carte du réseau. *Web. Site Web*, consulté en avril 2016. <http://www.rte-france.com/fr/la-carte-du-reseau>

[Scott, 2007] SCOTT, G.: CIPMA: Overview of CIP in Australia, risk and impact analysis. Group Geoscience Australia, 2007. *Présentation PowerPoint.32p.*

[SEDIF, a, 2016] Syndicat des eaux d'Île de France (2016). Le réseau en quelques chiffres. *Site Web*, consulté en avril 2016. http://www.sedif.com/reseau_chiffres.aspx

[SEDIF, b, 2016] Syndicat des eaux d'Île de France (2016). Fonctionnement. *Site Web*, consulté en avril 2016. http://www.sedif.com/fonctionnement_reseau.aspx

[SEDIF, c, 2016] Syndicat des eaux d'Île de France (2016). Le réseau. *Site Web*, consulté en avril 2016. http://www.sedif.com/accueil_reseau.aspx

[Setola, 2014] Setola, R.(2014). Modelling and investigating dependencies of CI. *Modelling, Simulation and Analysis of Critical Infrastructures Master Class* (Edition1) UIC Headquarters –Paris (France) –24-25 April 2014.

[SGDSN, 2013] Secrétariat Général de la Défense et de la Sécurité Nationale (2013) : Guide pour réaliser un plan de continuité d'activité. 80 p.

[SGDSN, 2015] Sécurité des activités d'importance vitale, Secrétariat Général de la Défense et de la Sécurité Nationale. *Site Web*, consulté en 2015. <http://www.sgdsn.gouv.fr/index.html>

[SNCF Infra, RGI, 2014] Direction déléguée au système d'information, division référentiel, SNCF Infra (2014). Référentiel géographique infrastructure : description des données. REF/SIG/RP08005. V2.5. 14/11/2014.

[TélécomPourTous, 2012] Télécoms pour tous (2012). Architecture, Générations & Réseaux Mobiles. *Site Web*, consulté en avril 2016. <http://www.telecomspourtous.fr/architecture-generations-reseaux-mobiles.html>

[Toubin, 2014] Toubin M. (2014). Améliorer la résilience urbaine par un diagnostic collaboratif; L'exemple des services urbains parisiens face à l'inondation. *Thèse de doctorat*, École doctorale économies, espaces, sociétés, civilisation : pensée critique, politique et pratiques sociales ED 382 Laboratoire PRODIG UMR 8586. 408 p.

[TRAPIL, 2016, carte] TRAPIL (2016). Carte du réseau de pipelines Le Havre –Paris. *Site Web*, consulté en avril 2016. http://www.trapil.fr/fr/pipelines_res_lhp.asp

[United Nations, 2012] International Strategy for Disaster Reduction, United Nations (2012). How to make cities more resilient - a handbook for local government leaders. A contribution to the global campaign 2010-2015 making cities resilient – my city is getting ready! (Eds. United Nations, Geneva). 101 p.

[Usov, 2014] Usov, A. (2014) Modelling and simulation techniques for critical infrastructure protection. *Modelling, Simulation and Analysis of Critical Infrastructures Master Class* (Edition1) UIC Headquarters –Paris (France) –24-25 April 2014.

[Visioreso, 2015] Visioreso, entreprise de géodétection, membre de la Fédération Nationale des Entreprises de Détection de Réseaux Enterrés (FNEDRE). *Site Web*, consulté le 09/01/2015 http://www.visioreso.fr/la-reglementation/#norme_S70-003

[Wang, 2013] Wang, J.(2013). Vulnerability and risk analysis of the guadeloupe island for disaster scenario using the modified I2SIM toolbox. *Master thesis*, The University of British Columbia. p. 91.

[Yazdani, 2011] Yazdani A., Otoo R., Jeffrey P. (2011). Resilience enhancing expansion strategies for water distribution systems: A network theory approach. *Environmental Modelling & Software* 26. p. 1574-1582.

[Yusta, 2011] Yusta J. M. , Correa G. J., Lacal-Arantequi R. (2011). Methodologies and applications for critical infrastructure protection: State-of-the-art. *Energy Policy* 39. p. 6100–6119.

[Zimmerman, 2002] Zimmerman, R. (2002). Enjeux et gestion des interactions entre les différents réseaux d'infrastructure. *Métropolis | Flux* n° 47. ISSN 1154-2721. pp 54 – 68. Disponible : <http://www.cairn.info/revue-flux-2002-1-page-54.htm>

[Zwingelstein, 2014] Zwingelstein G. (2014). Evaluation de la criticité des équipements. Méthodes analytiques. *Techniques de l'ingénieur*. Univers : Génie industriel, Pack : Maintenance, Base : Enjeux techniques de la maintenance. 32 p.

Table des illustrations

Figure 1 : Organisation de la thèse.....	5
Figure 2: Cartes des zones inondées par Sandy sur New-York [Haraguchi, 2014].....	7
Figure 3 : Diagramme de restauration du service électrique dans la ville de New-York [Gibbs, 2013].....	8
Figure 4 : Croisement des données géographiques pour obtenir les zones de dommages indirects [Haraguchi, 2014]	11
Figure 5 : La réponse de l’opérateur complétée par la réponse de l’Etat [ORSEC Réta p’Réseaux, 2015].....	18
Figure 6 : Carte de la zone inondable en cas de crue centennale [OCDE, 2014]	22
Figure 7 : Courbe de performance illustrative. Le temps t_d correspond à un évènement brutal, t_r correspond à la phase où le système a intégré le retour d’expérience et s’est amélioré [Francis, 2014]	36
Figure 8 : Découpe artificielle du système sociotechnique	37
Figure 9 : Les trois phases de la résilience et leur signification sur la courbe de performance [Francis, 2014]	43
Figure 10 : Comparaison des objectifs et des données.....	46
Figure 11 : Schématisation des outils de modélisation d’effets cascade ayant un fonctionnement explicite	47
Figure 12 : Schématisation des outils de modélisation d’effets cascade ayant un fonctionnement implicite	47
Figure 13 : Résultat de simulation avec l’outil DOMINO du CRP. A chaque infrastructure de chaque réseau est associée une zone d’impact spécifique [Robert, 2013]	49
Figure 14 : Structure d’un agent de CISIApro.....	51
Figure 15 : Simulation I2SIM : trois hôpitaux, une source d'eau potable et une station électrique. [WANG2013].....	52
Figure 16 : Fonctionnement de DIESIS [Rome, 2014]	53
Figure 17 : Représentation du modèle utilisé par CIPRNet pour le calcul de l’effet cascade interne au réseau électrique. Quatre postes de distribution, en rouge, sont initialement impactés par l’évènement [CIPRNet, D7.4, 2015].....	55
Figure 18 : Représentation du modèle utilisé par CIPRNet pour le calcul de l’effet cascade interne au réseau électrique. Effets cascade provoqués par les quatre postes de distribution initialement impactés, compte-tenu des possibilités de reconfiguration [CIPRNet, D7.4, 2015]	55
Figure 19 : illustration de l’intérêt de CIPRNet : différence d’estimation du nombre de défaillances dans le temps selon la connaissance de l’opérateur électrique ou selon le calcul du DSS de CIPRNet, qui tient compte des effets cascade électricité-télécommunications.....	56
Figure 20 : Outil FloodResilienCity : Zones d’aléa, d’endommagement et de dysfonctionnement du réseau d’assainissement de Dublin suite à un scénario d’inondation [Lhomme, 2012].....	57
Figure 21 : Fonctionnement de CIPMA [Lew, 2011]	58
Figure 22 : Positionnement stratégique des opérateurs de services urbains de Paris face à la crue centennale de la Seine. Adaptation d’une figure de [Toubin, 2014]	68
Figure 23 : Estimation du temps de réparation selon le nombre de lignes de traction électrique arrachées en même temps [Johansson, 2014]	69
Figure 24 : Frise chronologique du scénario utilisé par [Alsubaie, 2015].....	70

Figure 25 : Evolution de la performance d'un hôpital suite au scénario de la Figure 24, en nombre de patients traités par heure, selon qu'il n'y ait eu aucune optimisation de ressource (gauche) ou une optimisation de la ressource disponible (droite) avec l'outil I2Sim.....	70
Figure 26 : Courbe de performance illustrative des temps caractéristiques. Le temps t_d correspond à un évènement brutal, t_r correspond à la phase où le système à intégrer le retour d'expérience et s'est amélioré [Francis, 2014]	71
Figure 27 : Structure du chapitre 3.....	80
Figure 28 : Les 41 sources de dangers identifiées pour un territoire selon [Brilhac, 2009].....	81
Figure 29 : Enchaînement de scénarios courts grâce au classement des évènements initiateurs et des effets [Brilhac, 2009]	82
Figure 30 : Liste des familles des sources de danger [Dassens, 2008]	83
Figure 31 : Normes minimales d'enfouissement des réseaux [Visioreso, 2015]	85
Figure 32 : Enchaînement des modèles développés dans la toolbox DEMOCRITE	90
Figure 33 : Dépendances entre services urbains parisiens, évaluation de leur importance [Toubin, 2014].....	96
Figure 34 : Portrait sectoriel de GRDF d'après Toubin [Toubin, 2014]	98
Figure 35 : Relations entre services urbains parisiens représentés avec Neo4J	99
Figure 36 : Services urbains dont dépend directement Véolia	100
Figure 37 : Captures d'écrans du résultat représenté et d'un des chemins identifiés.....	101
Figure 38 : Alimentation de la commune de Marseille selon [Dutozia, 2013].....	109
Figure 39 : A gauche : les polygones de Voronoï contraints par les limites de la commune de Marseille, à droite : organisation des secteurs d'après la base de données d'ERDF selon [Dutozia, 2013]	109
Figure 40 : Raccordement des postes publics de distribution aux bâtiments résidentiels de Marseille en rouge, et aux postes source en gris [Dutozia, 2013].....	110
Figure 41 : Réseau électrique à simple dérivation sans possibilité de reconfiguration.....	112
Figure 42 : Illustration d'une structure de réseau MT en simple dérivation	113
Figure 43 : Illustration d'une structure de réseau MT en coupure d'artère	116
Figure 44 : Illustration d'une structure de réseau MT en double dérivation	117
Figure 45 : Schéma d'un réseau d'eau réaliste mais fictif.....	119
Figure 46 : Illustration du maillage du réseau de distribution de gaz [Ardouin, 2011]	123
Figure 47 : Schéma des enchaînements d'effets cascade interne/zone d'impact/effet cascade externe.....	126
Figure 48 : Communes privées d'électricité, sources d'approvisionnement et réseau fictif de transport d'eau.....	128
Figure 49 : Réseau de transport d'eau, réseau de distribution, et infrastructures de stockage.....	129
Figure 50 : Répartition des points de consommation associés aux routes pavillonnaires de la zone d'étude	130
Figure 51 : Carte des châteaux d'eau et de leur autonomie pour le scénario 1bis (vannes motorisées fermées).....	136
Figure 52 : Carte des châteaux d'eau des réservoirs avec leur autonomie pour le scénario 1 bis (vannes motorisées fermées). Les réservoirs avec une autonomie de moins de 4 heures ont une étiquette avec leur nom.	137
Figure 53 : Evolution de la disponibilité de l'eau aux points de consommation et zones d'impact évolutives	137
Figure 54 : Autonomie des châteaux d'eau et des réservoirs sur le scénario 1ter	139
Figure 55 : Autonomie des points de consommation avant une première rupture d'alimentation en eau potable sur le scénario 1ter	139
Figure 56 : Autonomie des points de consommation avant une première rupture d'alimentation en eau potable sur le scénario 2 (1 heure de coupure)	142

Figure 57 : Groupe d'influence des opérateurs parisiens de réseaux techniques face à la crue centennale de la Seine, sur la base des données de [Toubin, 2014].....	143
Figure 58 : Pyramide proposée pour la hiérarchisation entre opérateurs des calculs de zones d'impact pour la modélisation d'effets cascade.....	144
Figure 59 : Vulnérabilité humaine normalisée entre 7h30 et 9h30 un jour de semaine autour d'un quartier à activités tertiaires.....	148
Figure 60 : Vulnérabilité humaine normalisée entre 9h30 et 16h30 un jour de semaine autour d'un quartier à activités tertiaires.....	149
Figure 61 : Vulnérabilité humaine normalisée pendant la nuit entre deux jours de semaine.....	149
Figure 62 : Découpe simplifiée du système sociotechnique.....	156
Figure 63 : Les phases d'évolution du système. Gauche : Description d'après [Robert, 2010] et droite : vue du graphique performance/temps.....	157
Figure 64 : Enchaînement des vulnérabilités et échelles d'analyse.....	158
Figure 65 : Carte du système d'illustration.....	159
Figure 66 : Cartographie des liens fonctionnels.....	160
Figure 67 : Synthèse des liens fonctionnels.....	160
Figure 68 : Evolution temporelle de la vulnérabilité sur la courbe de performance du système.....	162
Figure 69 : Nouveau système, après avoir listé les infrastructures défaillantes par impact direct ou rupture de service support.....	164
Figure 70 : Echelle temporelle des phases de résilience.....	166
Figure 71 : les temps caractéristiques pour évaluer la capacité d'absorption.....	167
Figure 72 : Capacité d'adaptation <i>a posteriori</i>	168
Figure 73 : Etat du système illustratif à la fin de la phase d'absorption.....	173
Figure 74 : Illustration de la table utilisée par les opérateurs pour calculer leur vulnérabilité et leur capacité de résilience.....	179
Figure 75 : Seuils de performance pour évaluer la capacité d'adaptation du réseau de distribution d'électricité.....	183
Figure 76 : Apports du chapitre 4 et complémentarité des résultats avec le chapitre 3.....	189
Figure 78 : Diagramme de restauration du service électrique dans la ville de New-York [Gibbs, 2013].....	219
Figure 79: Dommages sur les infrastructures d'approvisionnement pétrolier de New-York pendant Sandy [Gibbs, 2013].....	220
Figure 80: Répartition des stations avec ou sans carburant dans New-York: aperçu de la journée du 2 novembre 2012 [Gibbs, 2013]......	221
Figure 81 : Les tunnels et ponts abîmés pendant Sandy autour de Manhattan. Le fond de carte montre les infrastructures intactes. [MTA, 2012].....	222
Figure 82 : Etablissements médicaux impactés directement et indirectement par Sandy [Haraguchi, 2014].....	224
Figure 83 : Illustration de la redondance du réseau électrique de transport autour de Paris [RTE, carte interactive, 2015].....	227
Figure 84 : Délais d'actions des réserves de puissance mobilisables par RTE [CRE, Services Systèmes, 2016].....	228
Figure 85 : Illustration d'une structure de réseau MT en simple dérivation.....	229
Figure 86 : Illustration d'une structure de réseau MT en coupure d'artère.....	229
Figure 87 : Illustration d'une structure de réseau MT en double dérivation.....	230
Figure 88 : Limite d'une opération de création de zones tampon autour des linéaires des routes, suivi d'une opération d'intersection.....	233
Figure 89: Erreur lors de l'opération de "bufferisation" suivi d'une opération d'intersection.....	233

Figure 90: Illustration des différences entre les données officielles de ponts routiers sur fret (4 points) et les ponts routiers calculés (4 zones, 9 polygones)	235
Figure 91 : Capture écran de google Earth sur la même zone que la Figure 90. Images © 2016 Google.....	236
Figure 92: Communes privées d'électricité, sources d'approvisionnement et réseau fictif de transport d'eau.....	237
Figure 93: Communes privées d'électricité, sources d'approvisionnement et réseau fictif de transport d'eau.....	248

Liste des tables

Table 1 : Description macroscopique des effets cascade de Sandy [Haraguchi, 2014]	10
Table 2 : Comparaison des dommages directs et indirects [Haraguchi, 2014].....	11
Table 3 : Ministres coordinateurs par secteur d'activité d'importance vitale [JO 2006, JO 2008].....	14
Table 4 : Structure des réseaux techniques et infrastructures principales	32
Table 5 : Résumé des différences entre les outils de modélisation des effets cascade. ABM : Agent Based Model, IIM : Input output Inoperability Model	59
Table 6 : Classement des vulnérabilités des réseaux techniques vis-à-vis des aléas naturels [CGEDD, 2013]	61
Table 7 : capacité de résistance des infrastructures réseaux dans Paris face à une inondation. Vert : bonne, vert clair : plutôt bonne, rose : plutôt mauvaise. [Toubin, 2014].....	63
Table 8 : Echelle de vulnérabilité face à des menaces d'actes malveillants [Liu, 2012]	64
Table 9 : Critères d'évaluation de la vulnérabilité des ouvrages du réseau d'eau potable [MSS, 2007].....	65
Table 10 : Comparaison entre les capacités de résilience utilisées par Toubin [Toubin, 2014] et celles adoptées dans notre travail	67
Table 11 : Evaluation des capacités de résilience des services urbains de Paris face à la crue centennale sans prise en compte des interdépendances [Toubin, 2014]	67
Table 12 : Classement des perturbations pouvant impacter un TcAE : Territoire composé d'Activités Essentielles [Rey, 2015]	84
Table 13 : Risques métiers associés au déclenchement d'un incendie dans un tunnel et à la présence d'un réseau technique dans le plafond de celui-ci [BSPP 118.2, 2012]	85
Table 14 : Attributs des zones sensibles présentant un risque professionnel potentiel.....	89
Table 15 : Liste des modèles de la toolbox DEMOCRITE	91
Table 16 : Répartition des réseaux techniques sur les zones présentant un risque professionnel, selon leur nature [Grangeat, 2016, a, a*]	93
Table 17 : Propension des zones sensibles à l'aléa «feu de véhicule » ou «feu de fret » à croiser un réseau technique [Grangeat, 2016, a, a*]	93
Table 18 : Services urbains étudiés dans [Toubin, 2014].....	95
Table 19 : Extrait de la table de comparaison de l'importance des fournisseurs indirects de Véolia.....	103
Table 20 : Classes qualitatives d'autonomies d'après Toubin [Toubin, 2014] et hypothèses quantitatives d'autonomie associées.....	103
Table 22 : Différences d'autonomie entre les dépendances directes et la prise en compte de dépendances d'ordre 2	105
Table 23 : Zones d'impact fixe par infrastructure sur un réseau électrique à simple dérivation sans possibilité de reconfiguration	112

Table 24 : Zones d'impact fixes par infrastructure sur un réseau électrique à simple dérivation avec possibilité de reconfiguration.....	114
Table 25 : Zones d'impacts par infrastructure sur le réseau d'eau potable de la Figure 45 ...	121
Table 26 : Communes touchées par la coupure d'électricité, et consommation d'eau associée	130
Table 27: Description des infrastructures et des équipements du réseau fictif.....	132
Table 28 : Variations de hauteur d'eau dans les châteaux d'eau au cours d'une journée sans panne électrique.....	133
Table 29 : Scénarios d'effets cascade étudiés	134
Table 30 : Autonomie des châteaux d'eau lorsque les vannes motorisées sont en position ouverte par défaut.....	135
Table 31 : Réservoirs R et châteaux d'eau C qui ont été vides lors du scénario 2 (1 heure de panne de courant)	141
Table 32 : Variations de hauteur d'eau dans les châteaux lors d'une panne électrique d'une heure à 7h30 (scénario 2).....	141
Table 33 : Aspects évalués pour la capacité d'adaptation R_{AD} <i>a priori</i>	169
Table 34 : Questionnaire d'évaluation de la capacité d'adaptation <i>a priori</i> sur l'aspect détection.....	170
Table 35 : Questionnaire d'évaluation de la capacité d'adaptation technique <i>a priori</i> hors aspect détection	171
Table 36 : Questionnaire d'évaluation de la capacité d'adaptation organisationnelle, <i>a priori</i> , à fournir une solution alternative au service contractuellement prévu	172
Table 37 : Evaluation de la capacité de réparation.....	172
Table 38 : Capacité de détection du cas illustratif	174
Table 39 : capacité d'adaptation du cas illustratif.....	175
Table 40 : Evaluation de la capacité de réparation du cas illustratif.....	176
Table 41 : Résumé des méthodes développées dans la thèse, de leurs avantages et de leurs limites	194
Table 42 : Lignes du métro impactés par une inondation ou des vents violents [Haraguchi, 2014].....	223
Table 43 : Liste des modèles de la toolbox DEMOCRITE	231
Table 44: Description des infrastructures et des équipements du réseau fictif.....	237
Table 45: Synthèse des liens entre les équipements électro-dépendants et les réservoirs.....	238
Table 46: Variations de hauteur d'eau dans les châteaux d'eau au cours d'une journée sans panne électrique (a)	239
Table 47: Variations de hauteur d'eau dans les châteaux d'eau au cours d'une journée sans panne électrique (b)	240
Table 48: Variations de hauteur d'eau dans les châteaux d'eau au cours d'une journée sans panne électrique (c)	241
Table 49 : Variations de hauteur d'eau dans les châteaux d'eau au cours d'une journée sans panne électrique (d).....	242
Table 50: Variations de hauteur d'eau dans les châteaux d'eau au cours d'une journée sans panne électrique (e)	243
Table 51: Description des pompes impactées par la coupure d'électricité.....	243
Table 52: Description des vannes motorisées et de leur asservissement.....	244
Table 53: Autonomies des châteaux d'eau pour le scénario 1 bis (VM fermées)	245
Table 54: Autonomies des réservoirs pour le scénario 1 bis (VM fermées)	245
Table 55: Autonomie des châteaux d'eau sur le scénario 1ter (VM non fonctionnelles pendant 1 heure, pompes indisponibles pendant 24 heures).....	246

Table 56: Autonomie des réservoirs sur le scenario 1ter (VM non fonctionnelles pendant 1 heure, pompes indisponibles pendant 24 heures).....	247
Table 57 : Questionnaire d'évaluation de la capacité d'adaptation <i>a priori</i> sur l'aspect détection.....	250
Table 58 : Questionnaire d'évaluation de la capacité d'adaptation technique <i>a priori</i> hors aspect détection	251
Table 59 : Questionnaire d'évaluation de la capacité d'adaptation organisationnelle, <i>a priori</i> , à fournir une solution alternative au service contractuellement prévu	252
Table 60 : Evaluation de la capacité de réparation.....	252

Annexe 1 : Présentation des projets qui encadrent ce travail de thèse

Les concepts de vulnérabilité, de résilience et d'effet cascade à la fois au profit de la sécurité civile et des opérateurs eux-mêmes, font l'objet de plusieurs projets de recherche, qui ont participé à l'accompagnement et au financement du présent travail. En effet un projet ANR (DEMOCRITE), un projet ANR Franco-Allemand (RESIWATER) et deux projets Européens (CIPRNet et PREDICT) ont contribué à échanger avec un réseau européen d'opérateurs de réseaux techniques, de chercheurs et de membres de la sécurité civile autour de ces notions. Ces projets ont également fortement orienté les recherches présentées dans ce document, notamment pour fournir les livrables à produire dans le cadre de chacun des projets. Le paragraphe ci-dessous présente de façon succincte les quatre projets et les met en articulation avec les catégories de résultats produits dans cette thèse.

1. Projet DEMOCRITE

Il s'agit d'un projet ANR commencé en mars 2014 et allant jusqu'en février 2018, dont l'acronyme signifie DEMonstrateur d'un MOteur de Couverture des RISques sur un TERRitoire. Ce projet a pour but de développer une plateforme logicielle d'aide à la décision intégrant des outils d'analyse et de couverture des risques pour la BSPP (Brigade de Sapeurs-Pompiers de Paris). Il est coordonné par le CEA-Gramat. Le SGZDS-Paris fait partie du comité de suivi de ce projet, de même que l'École des Mines d'Alès, via ARMINES.

« DEMOCRITE intègre des outils d'analyse et de couverture de risques sur un territoire. Utilisables en planification froide comme en temps de crise, ils serviront à mettre en adéquation la réponse de secours (en nature, nombre, et positionnement des moyens) avec la couverture des risques retenue, quantifiée et validée par l'autorité. [...] Ces outils visent à cartographier les probabilités d'occurrence des risques ainsi que les vulnérabilités intrinsèques (conséquences potentielles d'un évènement non souhaité). Les diverses approches d'optimisation des ressources seront évaluées. » [DEMOCRITE, 2013]

DEMOCRITE est séparé en trois axes. Le premier s'intéresse à la modélisation du développement dynamique de risques complexes. Deux risques de probabilité faible seront étudiés : la modélisation de la propagation d'incendie entre plusieurs immeubles, et la modélisation des effets potentiels d'une explosion en tenant compte de la géométrie urbaine (création d'un code rapide utilisable en condition réelle). Le deuxième axe s'intéresse à la cartographie des propensions de risques. En effet la répartition des probabilités d'occurrence des interventions BSPP n'est pas isotrope sur le territoire et dans le temps. Il s'agit donc d'étudier les corrélations entre l'aménagement du territoire et l'évolution statistique des risques. Cet axe est à mettre en perspective avec le développement du Grand Paris et la question du positionnement des nouvelles casernes.

Enfin, le dernier axe concerne la cartographie des vulnérabilités intrinsèques du territoire BSPP. Ces dernières correspondent aux caractéristiques propres d'un territoire qui jouent sur l'étendue des conséquences en cas d'accident. Deux résultats concernent cet axe et cette thèse. Le premier résultat propose la modélisation de la densité humaine (évolution par tranche horaire) dans un territoire urbain et la cartographie des infrastructures, dont la fonction est essentielle à la société (gouvernement, éducation, etc). Il permet de cartographier les vulnérabilités humaines et fonctionnelles du territoire (voir §3.6). La seconde partie s'intéresse aux infrastructures de réseaux techniques dont la défaillance pourrait créer un effet cascade et augmenter la zone initiale de l'évènement ainsi que sa gravité. En particulier, cet axe étudie la rupture d'approvisionnement des infrastructures. En effet, les interventions BSPP sur feu, lorsqu'elles ont proches d'un réseau technique enterré comme les lignes électriques HT, les canalisations de gaz ou celles de vapeur, nécessitent l'interruption de ces segments pour assurer la sécurité des primo-intervenants. Une combinaison simultanée de ces interventions pourrait placer le réseau dans une situation de défaillance. Ce travail propose donc une méthodologie pour cartographier ces zones d'interventions présentant un risque métier, comme cause potentielle d'effets cascade (voir §3.2).

2. Projet RESIWATER

RESIWATER est un projet Franco-Allemand commencé en juillet 2015 pour une durée de trois ans dont le titre est « Innovative Secure Sensor Networks and Model-based Assessment Tools for Increased Resilience of Water Infrastructures » [RESIWATER Proposal, 2015]. Il est coordonné par l'IRSTEA ; le CEA-Gramat en est partenaire. Trois opérateurs de réseau d'eau y participent : Veolia Île-de-France, Strasbourg Eurométropole et BWB (Berlin Wasser Betriebe).

Ce projet s'intéresse uniquement aux réseaux d'eau en tant qu'infrastructure dite critique – terminologie européenne équivalente de l'adjectif français « vital ». Il a pour but de développer des outils de gestion de crise spécifiques aux opérateurs de réseau d'eau et d'améliorer leur résilience vis-à-vis de trois catégories d'évènements : la destruction d'infrastructures du réseau d'eau, la pollution du réseau ou bien les conséquences d'une coupure d'électricité ou d'une attaque des systèmes de communication sur le réseau d'eau. Le dernier aspect est explicitement désigné comme un effet cascade.

Cinq étapes sont décrites pour ce projet :

- la définition des scénarios de crise par les opérateurs,
- la mise au point de réseaux de détecteurs sécurisés pour la détection de pollution,
- le développement d'un programme d'auto-apprentissage concernant la détection de signaux anormaux,
- le développement de codes de simulation hydraulique pour l'évaluation de la pression, du débit et du transport de polluant, dans les conditions extrêmes (fuite majeure par exemple),

- la création d'un outil d'aide à la décision pour améliorer la résilience des réseaux d'eau. Cet outil passe par une analyse des vulnérabilités et des résiliences des réseaux, méthode que l'auteur a développée et appliquée dans cette thèse (voir § 4).

3. Projets européens CIPRNet et PREDICT

L'acronyme CIPRNet signifie "Critical Infrastructure Preparedness and Resilience Research Network". Il s'agit d'un projet européen financé par le programme FP7, commencé en mars 2013 et qui se termine en mars 2017. Il a pour but d'établir un "réseau d'excellence" entre les acteurs des pays européens engagés dans la protection des infrastructures critiques (opérateurs, politiques, laboratoires de recherche) [DOW CIPRNet, 2012]. Ce réseau formera la base du centre virtuel EISAC (European Infrastructures Simulation & Analysis Centre) prévu pour 2020. CIPRNet rassemble les efforts de R&D des partenaires et les résultats de 50 projets européens déjà menés sur le sujet de la protection des infrastructures critiques. Tous les travaux d'état de l'art ou de structuration des connaissances avaient pour but d'élaborer un langage commun entre les participants. Le projet favorise les échanges de personnels entre les instituts de recherche. L'auteur a participé aux livrables demandant un état de l'art sur les outils de modélisation des effets cascade (voir le paragraphe 2.3 de ce document), et à la formalisation d'une structure permettant la création de scénarios. L'auteur a également bénéficié de deux programmes d'échanges avec les partenaires de ce projet. Le premier a été réalisé au Joint Research Center (JRC) de la Commission Européenne, plus précisément à Ispra (Italie) au sein de l'Institut pour la sécurité et la protection des citoyens. Cet échange de deux semaines en 2014 a permis d'appréhender les différents outils à disposition du JRC autour de la gestion de crise et d'approfondir l'état de l'art sur la modélisation des effets cascade. Le deuxième échange a eu lieu en 2015 à l'ENEA au Centro Ricerche Casaccia, qui développe en partie l'outil CIPRNet, instrument prometteur pour la modélisation des effets cascade. Cet échange a permis de mieux comprendre les modules développés, les limites de l'outil et aussi la façon dont cet outil est perçu actuellement par la sécurité civile à Rome (voir § 2.3 de ce document).

L'acronyme PREDICT signifie « PREparing for the Domino effect in Crisis siTuations ». Il s'agit également d'un projet européen financé par le programme FP7, commencé en avril 2014 et à finir pour mars 2017, dont le CEA Gramat est coordinateur. PREDICT a pour but d'élaborer un logiciel d'aide à la décision pour les situations de crise impliquant des infrastructures critiques. Le logiciel PREDICT sera décomposé en deux parties : une partie de modélisation des effets cascade – comprenant une partie de prévision des causes des effets cascade, une partie de prévision des conséquences de ces effets cascade, et une partie de support à la décision (modélisation des effets des décisions prises, et évaluation du risque associé) [DOW PREDICT 2013]. L'auteur a participé à l'état de l'art des méthodes de simulation et logiciels existants (voir § 2.3) et à la comparaison des structures de gestion de crise selon les pays européens.

Annexe 2 : Mise en situation de la problématique de thèse : l'exemple de l'ouragan Sandy (2012, Etats-Unis)

Les catastrophes majeures qui se déroulent dans nos sociétés modernes mettent bien souvent à jour l'extrême complexité de nos systèmes : chaque service repose sur le fonctionnement d'une multitude d'infrastructures hétérogènes, et la défaillance de l'une peut faire tomber le système entier par effet cascade. L'ouragan Sandy du 29 octobre 2012 a été estimé comme le deuxième ouragan le plus destructeur des Etats-Unis en termes de pertes économiques, derrière l'ouragan Katrina [Haraguchi, 2014]. L'étude de Sandy met en évidence la difficulté et le besoin de comprendre les impacts indirects lors d'une catastrophe majeure. Le retour d'expérience suivant prend en compte tous les impacts liés aux dysfonctionnements des réseaux, et par là même les besoins potentiels d'anticipation. Il illustre également la difficulté de prendre des décisions lorsque les données sur l'état des réseaux techniques ne sont pas disponibles immédiatement.

1. Gestion de crise et dommages directs subis par la ville de New-York

La ville de New-York a été particulièrement touchée par Sandy. L'emblématique Manhattan a subi de sévères coupures d'électricité, les ponts et tunnels la reliant au reste de la ville ont été endommagés et certains hôpitaux évacués. Les paragraphes suivants évoquent les différents secteurs touchés et leurs gestions par la ville de New-York. Une seconde partie abordera les impacts indirects qui en ont découlé. Les zones côtières et les zones de basse altitude ont été évacuées avant l'ouragan (zone A du CSP : Coastal Storm Plan) ce qui correspond à 375 000 New-Yorkais, 6 hôpitaux, 1 hôpital psychiatrique, 22 nurseries et 18 établissements de santé pour adultes. Le niveau d'eau atteint lors de Sandy était de 4,3 m alors que l'inondation centennale avait été calculée pour 3,7 m. Le retour d'expérience suivant correspond à une synthèse du document réalisé par la Mairie de New-York « Sandy after Action » en 2012 qui décrit l'ensemble des mesures prises et les recommandations pour améliorer la gestion de crise. [Gibbs, 2013].

Il explique, réseau par réseau, l'utilisation de ceux-ci pour la gestion de crise, les défaillances constatées et la réaction de la mairie face à leur défaillance. La seconde sous-partie détaille les enjeux sociétaux (établissements médicaux, écoles, centres d'accueils des victimes, sécurité publique) impactés soit directement par Sandy, soit indirectement par la rupture de réseaux techniques. Enfin une troisième sous-partie résume les recommandations d'amélioration en matière de gestion de crise faite par la mairie de New-York. L'intérêt de prendre en compte les effets cascade entre réseaux techniques et d'utiliser un SIG (Système d'Information Géographique) y est mis en valeur.

2. La perturbation des réseaux techniques pendant Sandy

2.1.1. Communication et réseaux de télécommunication:

La ville est responsable en période de crise de diffuser des informations fiables et claires sur la situation envers le public. Elle a énormément communiqué à travers les réseaux sociaux, les télévisions, les sites internet de la ville et youtube. Des messages écrits ont été adressés aux journaux papier comprenant plus de 100 magazines avec une orientation ethnique ou communautaire. Par ailleurs la mairie a utilisé Notify NYC, un système capable d'envoyer une alerte par téléphone fixe, mobile, e-mail ou twitter à plus de 165 000 utilisateurs enregistrés. En plus de ce système, New-York a utilisé un outil d'appel automatique localisé (CMAS : Commercial Mobile Alert System) créé par la FCC (Federal Communications Commission) pour envoyer un texto à tous les téléphones mobiles équipés localisés dans la zone d'intérêt (par exemple : la zone à évacuer), quel que soit le type d'abonnement du téléphone ou son origine. Ce CMAS a été utilisé trois fois : pour l'ordre d'évacuation des zones côtières le 28 octobre, puis deux fois au pic de la tempête le 29 octobre. En plus des communications vers les citoyens, la mairie a mis en place une hotline pour que les élus locaux fassent remonter les besoins et problèmes du terrain. Les Etats-Unis possèdent deux numéros d'appels des secours : le 911 pour des urgences vitales et le 311 pour les autres formes d'assistances (arbres tombés sur la voie par exemple). Le 911 a reçu 20 000 appels par heure pendant l'ouragan avec un temps moyen d'attente de 5 minutes et 30 secondes sans rejeter aucun appel. Il n'y a pas eu d'interruption du 311, malgré les dommages aux infrastructures de télécommunication.

Le hub de Verizon's Lower Manhattan a été inondé ; les tours de télécommunications qui fonctionnent sur du courant commercial et ne sont pas obligées d'avoir un générateur de secours sont tombées. La défaillance de ces dernières infrastructures a perturbé à la fois le réseau filaire, le réseau mobile et le réseau internet pendant plusieurs jours [Gibbs, 2013]. Dans les lieux où les télécommunications fonctionnaient, certains ne pouvaient pas pour autant être contactés à cause de la surcharge des réseaux de télécommunication. Pour faire face à cette pénurie la ville a travaillé avec les équipes du NDR (National Disaster Recovery) pour déployer des antennes mobiles sur camion (COWs pour « Cells on Wheels » et COLTs pour « Cells on Light Trucks ») et des plots de rechargement. Des tracts étaient distribués dans les endroits sans accès aux télécommunications. [Gibbs, 2013].

Il n'y a pas eu de mention publique de conséquences sur l'organisation de la sécurité civile elle-même (pour la coordination par exemple) de ces perturbations de réseaux « civils » de communication.

2.1.2. Réseau électrique :

L'inondation du poste source Con Edison au 13th Street ainsi que de quatre postes du LIPA (Long Island Power Authority) ont interrompu le courant à environ 63 000 comptes clients, soit environ 1,5 million de personnes vers 20 heures le lundi 29 octobre 2012 [Gibbs, 2013]. Les zones touchées vont de la 34th Street South jusqu'au World Trade Center. Puis les arbres

Annexe 2 : Mise en situation de la problématique de thèse : l'exemple de l'ouragan Sandy (2012, Etats-Unis)

tombés ont coupé le courant à 70 % des clients dans le Bronx, Brooklyn, Queens et les Staten Island. Le noir était également total dans les Rockaways, Coney Island et les environs côtiers. La ville a mis en place une force d'intervention qui a placé au mieux les 230 générateurs de secours pour répondre dans un premier temps aux besoins vitaux puis aux habitations. La ville a également travaillé en collaboration avec les services de Con Edison et de LIPA pour favoriser et hiérarchiser le retour de l'électricité à travers la zone inondée. [Gibbs, 2013].

Une des recommandations issues du retour d'expérience de Sandy réalisé par la mairie correspond au développement d'une évaluation des différents besoins en électricité sur son territoire et de standards sur la restauration de services essentiels en cas de panne de courant. Comme le montre la **Figure 77** la remise en état du réseau électrique est un processus étalé dans le temps et dans l'espace.

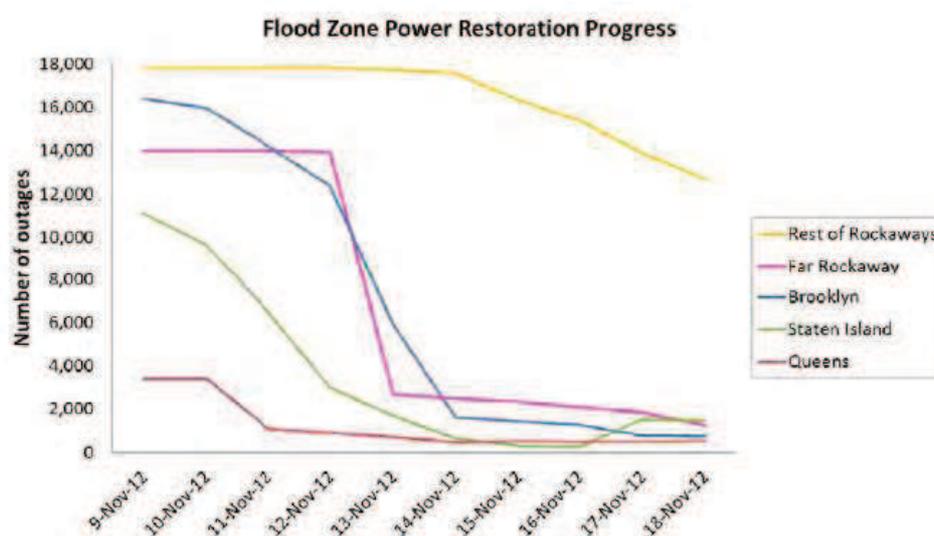


Figure 77 : Diagramme de restauration du service électrique dans la ville de New-York [Gibbs, 2013]

2.1.3. Approvisionnement en carburant de la ville

L'approvisionnement en carburant d'une ville est fait pour partie par un réseau technique à proprement parler (pipelines) puis par un réseau de distribution par camions.

Le 6 novembre, deux raffineries sur la trajectoire de Sandy (Hess Port Reading dans le New Jersey et Bayway Phillips 66 à Linden) étaient encore arrêtées entraînant une perte de 26 % de la capacité totale de production journalière de barils [Haraguchi, 2014]. Les débris dans les ports ont fortement gêné l'approvisionnement par bateaux en carburant, et les pipelines importants du New-Jersey ont été fermés quatre jours à cause des coupures électriques [Haraguchi, 2014]. **La Figure 78** ci-dessous localise les dommages matériels sur la chaîne d'approvisionnement en carburant de la ville de New-York. Cela illustre la propagation de perturbations en interne d'un réseau technique à d'autres infrastructures, non endommagées

Annexe 2 : Mise en situation de la problématique de thèse : l'exemple de l'ouragan Sandy (2012, Etats-Unis)

directement par la tempête. La majorité des stations essence n'ont pas été impactées par l'ouragan ou par les coupures d'électricité, mais par l'arrêt de cette chaîne d'approvisionnement.

La ville avait anticipé Sandy en faisant le plein des différents véhicules et générateurs, et le NYPD a réussi à maintenir un approvisionnement indépendant en carburant même après la tempête. Environ 25 000 véhicules d'urgences ou véhicules essentiels ont eu accès à cette réserve en trois points de distributions, ainsi qu'à 10 stations identifiées en partenariat avec la ville pour les véhicules d'urgence. Pour l'alimentation en carburant du particulier, la ville a demandé une dérogation au Jones Act pour permettre aux camions citernes étrangers de pouvoir transporter du carburant depuis le Golf de Mexico. L'absence de transports en communs a provoqué de nombreux embouteillages sur les grands axes, perturbant la circulation des véhicules de secours. Le maire a imposé un nombre minimum d'occupants par véhicule utilisant un pont vers Manhattan le 1^{er} et le 2 novembre. Du 9 novembre au 24 novembre, le maire a mis en place un rationnement du carburant (sauf pour les taxis pendant certaines heures), même si l'ensemble des stations n'étaient pas fermé (**Figure 79**). Sandy a mis en évidence le besoin d'un plan dédié à la pénurie de carburant pour plus rapidement lever celle-ci. [Gibbs, 2013].

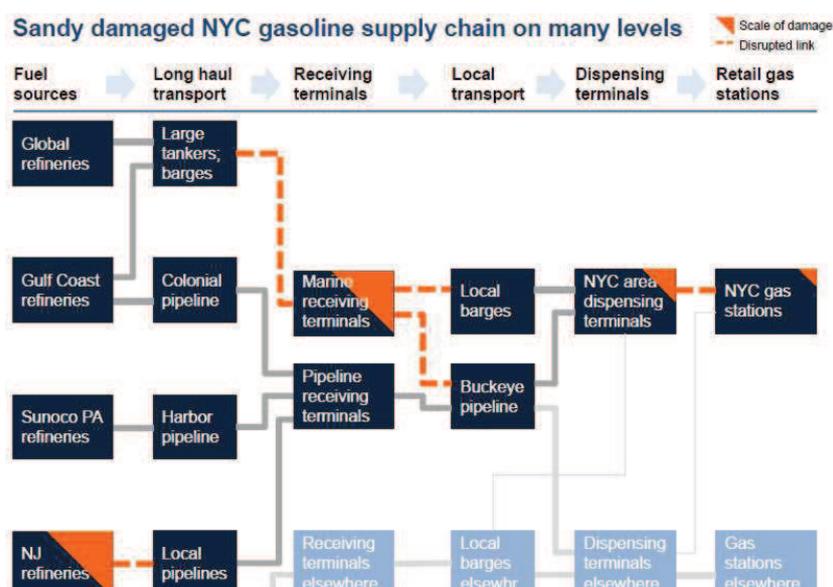


Figure 78: Dommages sur les infrastructures d'approvisionnement pétrolier de New-York pendant Sandy [Gibbs, 2013]

Le département des services administratifs de la ville (department of city wide administrative services) était responsable de l'approvisionnement en carburant des services de la ville (Service sanitaire ; département des parcs et des loisirs, département des bâtiments, département du transport, afin de déblayer voies et bâtiments, département de l'environnement pour pomper l'eau des bâtiments) et des services d'intervention. La disponibilité du carburant dans les stations-services était connue grâce au site GasBuddy.com

Annexe 2 : Mise en situation de la problématique de thèse : l'exemple de l'ouragan Sandy (2012, Etats-Unis)

qui répertoriait en temps réel le prix du carburant par site d'approvisionnement, comme le montre la **Figure 79**. [Gibbs, 2013].

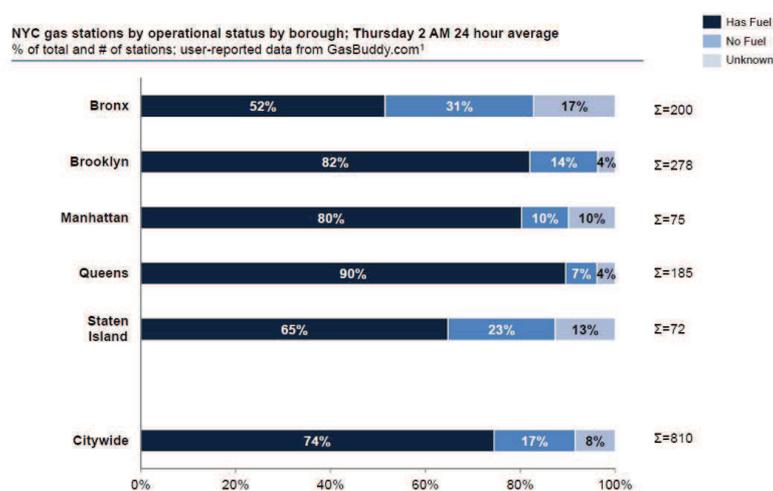


Figure 79: Répartition des stations avec ou sans carburant dans New-York: aperçu de la journée du 2 novembre 2012 [Gibbs, 2013].

2.1.4. Réseau routier

De nombreuses infrastructures routières ont été impactées par Sandy (**Figure 80**). La corrosion des équipements exposés longtemps à de l'eau salée a amplifié les dommages de l'inondation. Six tunnels routiers ont été mis hors service, dont le Brooklyn-Battery Tunnel (47 700 véhicules et 3 100 bus de trafic quotidiens, fermé pendant 21 jours) et le Queens-Midtown Tunnel (81 000 véhicules et 1 100 bus par jour, fermé pendant 10 jours). Les feux de trafic étant hors service pendant des semaines sur plus de 3 500 intersections, le NYPD a mobilisé 1 200 policiers pour gérer la circulation aux croisements importants. Par ailleurs le FDNY a enlevé les arbres tombés et nettoyé 250 rues afin notamment de faciliter l'accès aux secours.

Par ailleurs Sandy a généré plus de 700 000 tonnes de débris et a abattu 200 00 arbres. Ils ont été évacués par la DRTF (Debris Removal Task Force). Sept sites de stockage (présélectionnés en 2006) ont été mis en place jusqu'au 19 novembre. Les inondations ont également détruit 10 000 bateaux et 100 000 véhicules qu'il a fallu évacuer, sans compter les 1,53 millions de m³ de sable déplacés par la tempête. [Gibbs, 2013]. Par ailleurs les services de la ville ont dû pomper l'eau dans plusieurs tunnels urbains (Battery Park Underpass et le West Street Underpass). L'armée a apporté son aide pour pomper l'eau des tunnels importants et des métros.

Afin de mieux comprendre à quel point Manhattan était devenue difficile d'accès, la carte ci-dessous illustre les franchissements d'eau abîmés pendant Sandy (cela inclut les réseaux métropolitains, présentés par la suite).

Annexe 2 : Mise en situation de la problématique de thèse : l'exemple de l'ouragan Sandy (2012, Etats-Unis)



Figure 80 : Les tunnels et ponts abîmés pendant Sandy autour de Manhattan. Le fond de carte montre les infrastructures intactes. [MTA, 2012]

2.1.5. Le réseau métropolitain

Ce réseau a été extrêmement impacté par Sandy, mais de nombreux dégâts ont été évités. En effet, avant l'ouragan, le réseau a été fermé, les trains et les équipements ont été mis en hauteur et des sacs de sable ont été déposés autour des équipements sensibles. Malgré cela, la table ci-dessous illustre les différentes lignes impactées, leur temps de réouverture et leur importance relative. Pendant ces périodes de travaux, la NYCEDC (New York City Economic Development Corporation) a mis en place un système temporaire de ferrys pour traverser les bras d'eau [Gibbs, 2013]. En tout, 8,6 millions d'utilisateurs quotidiens du métro ont été impactés.

Annexe 2 : Mise en situation de la problématique de thèse : l'exemple de l'ouragan Sandy (2012, Etats-Unis)

Table 41 : Lignes du métro impactés par une inondation ou des vents violents [Haraguchi, 2014]

Nom des lignes	Ligne de transport en commun	Nombre d'utilisateurs quotidiens	Cause des dommages	Période de fermeture
53 Street Tube	Ligne E & Ligne M	275 000	1 900m3 d'eau salée	7 jours
Steinway Tube	Ligne 7	200 000	3 800m3 d'eau salée	6 jours
LIRR East River Tunnels	LIRR+ Amtrak	226 000	5 100m3 d'eau salée	12 jours pour une réouverture totale
Greenpoint Tube	Ligne G	55 000	11 400m3 d'eau salée	10 jours
Canarsie Tube	Ligne L	200 000	26 500m3 d'eau salée	11 jours
Rutgers Tube	Ligne F	130 000	5 700m3 d'eau salée	7 jours
Cranberry Tube	Ligne A & Ligne C	230 000	5 700m3 d'eau salée	7 jours
Clark Tube	Ligne 2 & Ligne 3	145 000	1 900m3 d'eau salée	6 jours
Montague Tube	Ligne R	65 000	102 200m3 d'eau salée	53 jours
Joralemon Tube	Ligne 4 & Ligne 5	185 000	Pas d'inondation longue	6 jours
Rockaway Ligne	Ligne A	31 000	Les vents violents et la houle ont détruit le pont	7 mois

2.1.6. Le réseau d'eau

L'usage de l'eau était surveillé en continu grâce aux compteurs automatisés (AMR : Automated meter readers) qui ont permis de retrouver certaines habitations qui n'auraient pas été évacuées avant l'orage. Ces données ne sont pas exhaustives dans la mesure où la coupure d'électricité a certainement perturbé certains AMR. La mairie a mis en place et communiqué autour de points de distribution d'eau après Sandy : au 31 janvier 2013, 1 million de bouteilles d'eau avait été distribuées suite à Sandy. Immédiatement après Sandy, certains résidents de bâtiments à grande hauteur n'avaient plus accès à l'eau courante. La mairie a donc mis en place un système de navettes pour accéder aux centres de vie avec mise à disposition de douches portables et commodités pour se laver. A partir du 18 novembre, la mairie a mis en

Annexe 2 : Mise en situation de la problématique de thèse : l'exemple de l'ouragan Sandy
(2012, Etats-Unis)

place des bouilleurs pour avoir accès à de l'eau chaude dans certains bâtiments occupés. [Gibbs, 2013].

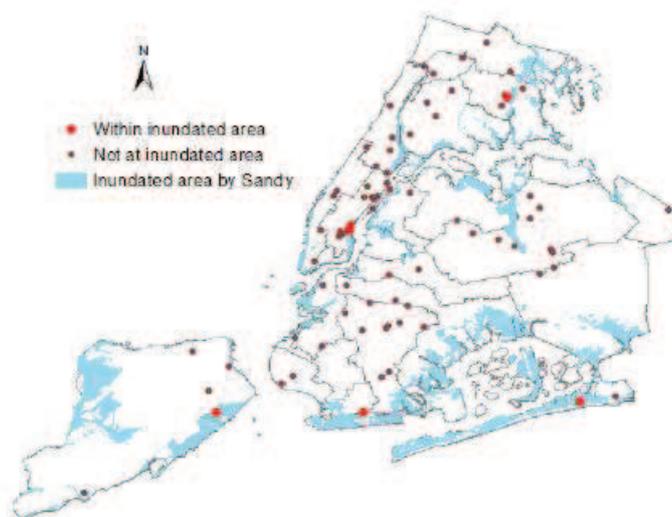
L'auteur a trouvé peu d'information sur les coupures éventuelles de ce réseau, sa baisse localisée en pression ou la non-potabilité de l'eau. Une conclusion du rapport du maire souligne néanmoins que les New-Yorkais ont souffert des impacts indirects liés à la coupure « d'électricité, d'approvisionnement en carburant et du réseau d'eau ».

2.1.7. Les impacts directs de Sandy sur les besoins vitaux des victimes

Les chiffres suivants ne peuvent pas être directement reliés à la présence de coupures de réseaux techniques, mais ils illustrent l'ampleur humaine de la catastrophe Sandy.

2.1.7.1. *Etablissements médicaux impactés (enjeux)*

En 2012, 20 % des hôpitaux, 34 % des établissements médicaux pour adultes, 20 % des nurseries se situaient dans les zones d'inondation penta-centennale (1 tous les 500 ans). Malgré l'obligation des établissements hospitaliers d'avoir un plan d'évacuation et des générateurs de secours, la durée du black-out et les impacts directs de Sandy ont forcé 5 hôpitaux et 30 nurseries à évacuer leurs 6 300 patients pendant ou après Sandy vers les places vacantes ou vers des abris adaptés aux besoins spécifiques médicaux (Special Medical Needs Shelters). Par ailleurs le retour d'expérience a souligné le manque d'une procédure de retour vers les bâtiments une fois l'ouragan passé, comme par exemple une lettre qui confirmerait que les services essentiels sont bien à nouveau disponibles pour reprendre les activités médicales. [Gibbs, 2013]. La carte ci-dessous illustre les hôpitaux inondés et ceux non inondés.



(e) Health care facility

Figure 81 : Etablissements médicaux impactés directement et indirectement par Sandy
[Haraguchi, 2014]

Annexe 2 : Mise en situation de la problématique de thèse : l'exemple de l'ouragan Sandy (2012, Etats-Unis)

2.1.7.2. Mise en place d'abris pour les victimes

Les 73 sites ont abrité 6 800 évacués (sur les 71 000 évacués des zones côtières), ceux nécessitant des soins médicaux spéciaux ayant été dirigés vers des abris spécialisés (SMNS : Special Needs Shelters). La plupart des abris est située dans les écoles et est approvisionnée en nourriture et commodités pour trois jours. Le premier tiers des abris a été ouvert plus d'un jour avant l'arrivée de Sandy et avant la fermeture des routes d'évacuation. La plupart des réfugiés sont arrivés juste après la tempête le 30 octobre. Le 2 novembre, la mairie a renforcé les équipements des abris restants et le 12 novembre ; les réfugiés restant ont été transférés dans d'autres hébergements, notamment des hôtels. [Gibbs, 2013].

Neuf centres de restauration ont été ouverts et ont servis 10 000 clients dans les premiers 16 jours. 43 000 repas, 11 000 couvertures et 3 500 packs d'eau ont été distribués aux résidents chez eux. Le 1^{er} novembre, la ville a ouvert 17 points de distributions pour fournir 2,5 millions de repas et plus d'un million de bouteilles d'eau. Plusieurs partenariats avec des fournisseurs ou l'association des « food trucks » ont permis de servir des repas chauds.

2.1.7.3. Enjeux de sécurité publique

Avant l'ouragan, la mairie a convoqué du personnel supplémentaire pour notifier aux habitants l'ordre d'évacuation et la présence d'abris, et distribuer des paquets de nourriture. La division opérations spéciales du NYPD et les sauveteurs maritimes du FDNY ont pré-positionné du personnel dans les Staten Island, Brooklyn et Queens qui sont intervenus auprès de 2 200 personnes. Le FDNY a convoqué 600 personnels supplémentaires du « Fire and Emergency Medical Services », et activé une cellule de gestion de crise de 50 à 60 personnes appelée « Incident Management Team » spécialisée dans la logistique, la finance, la planification et la gestion d'événements étendus et complexes – spécialement pour l'évacuation et le placement de personnes âgées. Le NYPD a organisé des remplacements de personnel toutes les 12 heures. Le FDNY et le NYPD ont effectué des recherches dans 31 000 logements et commerces pour localiser et assister les personnes dans les zones sévèrement affectées.

Juste après l'ouragan, la mairie a mis en place 500 lampadaires pour diminuer la criminalité et aider les secours à intervenir, mais aussi pour représenter des points d'échange des informations et permettre de charger les appareils électroniques. Par ailleurs les équipes du FDNY ont pompé l'eau de plus de 2 700 maisons et commerces. Le 30 octobre, le DOB (Département of Buildings) a évalué les impacts de Sandy sur les bâtiments pour classer ceux sûrs, ceux où il existe un doute sur leur sûreté et ceux présentant un risque sur leur intégrité physique. [Gibbs, 2013].

Annexe 3 : Structures des réseaux électriques de transport et de distribution

Réseau électrique

Il possède une structure hiérarchisée, mais pas arborescente. On peut distinguer six catégories d'infrastructures sur le réseau : le réseau BT, les postes de distribution, le réseau Moyenne Tension (MT) dit de distribution, les postes source, le réseau HT de 225 kV, 90 kV ou 63 kV, dit HTB (réseaux régionaux de répartition qui alimentent les réseaux de distribution publique et les gros consommateurs industriels), le réseau HT 400 kV (réseau dit de transport, qui relie les centrales de production et les points d'interconnexions avec les autres pays) et les centrales de production.

Structure du réseau électrique de transport

Le réseau de transport 400 kV est maillé et les infrastructures redondantes en fonction du niveau de sécurité désiré. Il est alors configuré pour supporter au minimum la perte d'une infrastructure (N-1), voire de deux infrastructures sans impact (N-2) :

- « N-1 : les aléas « simples » : liaisons, transformateurs ou autotransformateurs, groupes de production, tronçon de jeu de barres pour lesquels les conséquences acceptées sont nulles ou très faibles ;
- N-2 : les aléas considérés concernent deux éléments simultanément (ou dans un temps très court) ; seuls ceux ayant une probabilité encore « significative » et/ou des niveaux de conséquences majeures sans dispositions préventives sont analysés et des niveaux de conséquences acceptés définis ;
- N-k ($k > 2$) : les aléas correspondants concerneraient trois éléments ou plus de façon simultanée, ou dans un temps très court ; les probabilités (sauf cas particuliers de modes communs) sont infimes. Il n'est pas prévu d'analyse de ces aléas et d'actions préventives. Pour ces types d'aléas « hors dimensionnement », on accepte d'avoir recours, s'ils surviennent, à des actions de type plan de défense. » [RTE, 2015]

On a donc un réseau de transport d'électricité maillé, mais avec des niveaux de redondance non homogènes sur le territoire. La **Figure 82** illustre la cartographie du réseau RTE autour de l'Île-de-France (situation particulière non extrapolable aux autres villes). L'alimentation électrique de Paris est particulière : on distingue sur la figure 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, on dit pour Paris (et uniquement Paris) que c'est le réseau MT qui assure la HT (cas particulier expliqué plus loin).

Le réseau de transport est adaptable au sens où RTE (entreprise exploitante du réseau) dispose de réserves de puissance mobilisable en cas de déséquilibre soudain entre la production et la consommation (attention, l'électricité ne se stocke pas, ne pas confondre les propos !). Il en existe de plusieurs sortes : les services système (réserves primaire et secondaire) et le

Annexe 3 : Structures des réseaux électriques de transport et de distribution

mécanisme d'ajustement (réserve tertiaire). Les délais d'action sont intéressants à noter sur la **Figure 83**. La réserve primaire est dimensionnée pour répondre à la perte des deux plus gros groupes de production de l'Europe (sur le domaine synchrone), soit 3000 MW. Celle-ci se base sur l'obligation de tous les groupes de production connectés de réserver une partie de la puissance afin de maintenir cette réserve, mobilisable en 30 secondes. La France participe à hauteur de 600 MW. La réserve secondaire en France concerne les producteurs de plus de 120 MW, qui doivent affecter une partie de leur puissance pour constituer une réserve comprise entre 500 MW et 1000 MW en fonction de la période de l'année. Si la réserve primaire et secondaire ne suffisent pas, la réserve tertiaire (manuelle) est constituée des producteurs et consommateurs qui acceptent d'ajuster à hauteur de 10 MW leur production ou consommation. Les réserves secondaire et tertiaire sont activables en 15 minutes [CRE, Services Systèmes, 2016].

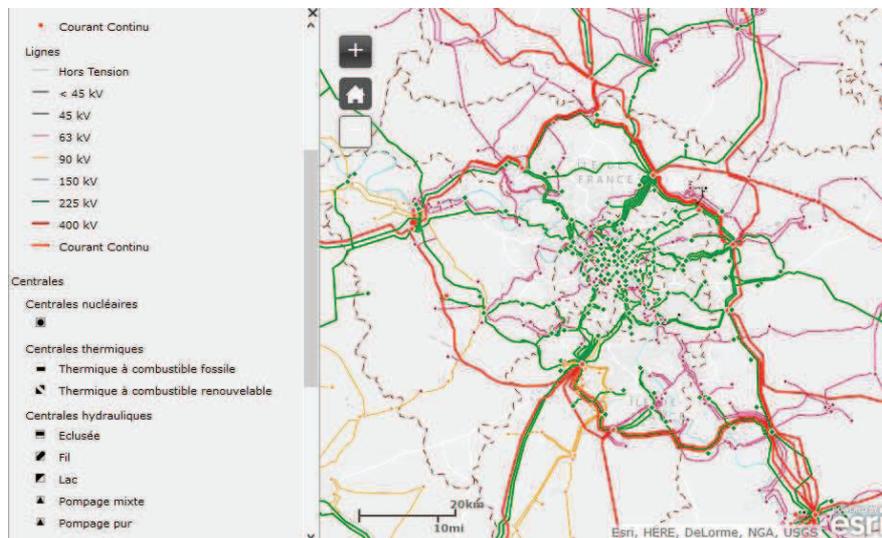


Figure 82 : Illustration de la redondance du réseau électrique de transport autour de Paris [RTE, carte interactive, 2015]

Annexe 3 : Structures des réseaux électriques de transport et de distribution

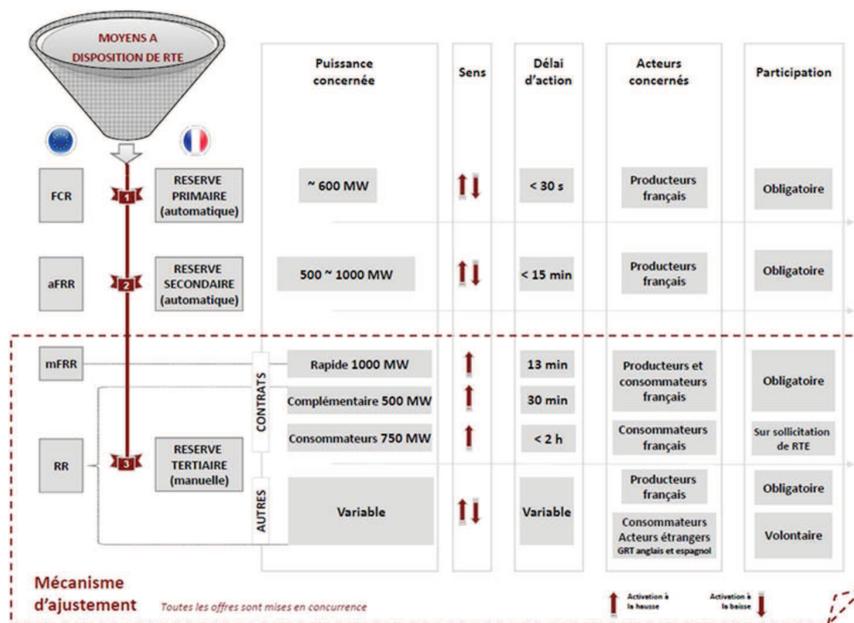


Figure 83 : Délais d'actions des réserves de puissance mobilisables par RTE [CRE, Services Systèmes, 2016]

La structure du réseau électrique de distribution

La structure du réseau HTA (synonyme de moyenne tension, à ne pas confondre avec HTB – haute tension) est fonction de la densité actuelle de la zone à desservir, ou de sa probabilité à se densifier. On peut distinguer trois types de structures pour le réseau MT.

- Le réseau en simple dérivation (**Figure 42**) est présent dans les milieux ruraux [EDF, 1994] ou les zones à faible densité de charge, avec des réseaux principalement aériens. À noter qu'une structure arborescente n'est pas figée et peut être reconfigurée si-besoin, via des points de connexions, en se connectant à d'autres parties du réseau. La capacité de protection principale du réseau correspond au disjoncteur du poste source.
- La structure en « coupure d'artère » (**Figure 43**) est utilisée dans les agglomérations. Il s'agit d'une boucle où les postes HTA/BT peuvent choisir entre une alimentation en « amont » ou en « aval » sur la boucle HTA, en fonction de la localisation du défaut sur la ligne.
- La structure en double-dérivation (**Figure 44**) est utilisée dans les zones urbaines et notamment à Paris. Dans la capitale, le réseau MT relie entre eux les différents postes source, de telle sorte que si l'un d'entre eux n'est plus disponible, il est toujours possible de s'alimenter à un autre poste source fonctionnel. De plus la double-dérivation permet de perdre une ligne MT et de se brancher facilement sur la deuxième.

Annexe 3 : Structures des réseaux électriques de transport et de distribution

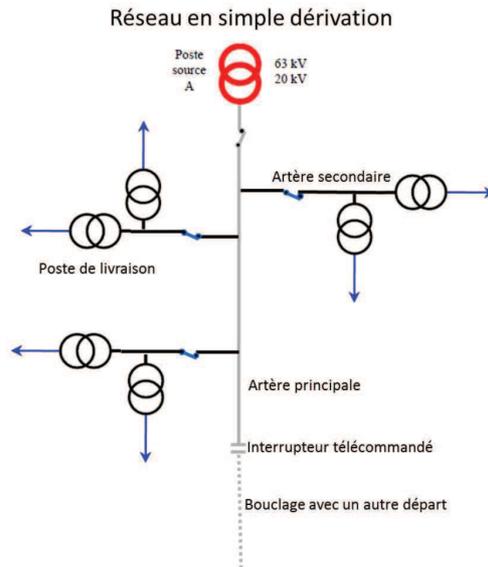


Figure 84 : Illustration d'une structure de réseau MT en simple dérivation

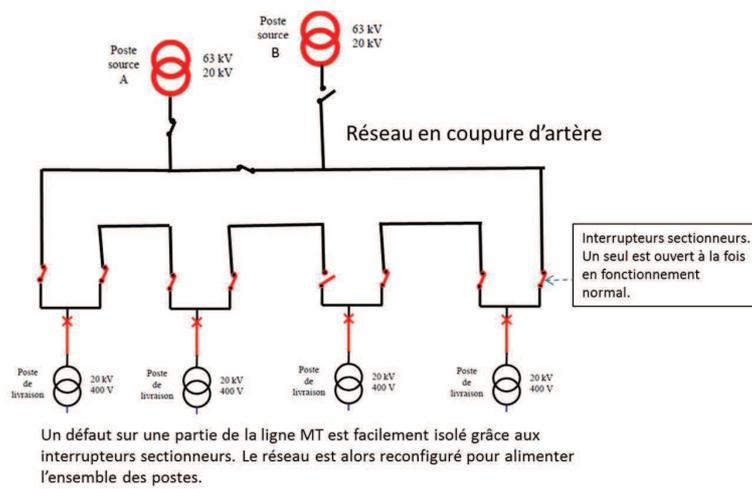


Figure 85 : Illustration d'une structure de réseau MT en coupure d'artère

Annexe 3 : Structures des réseaux électriques de transport et de distribution

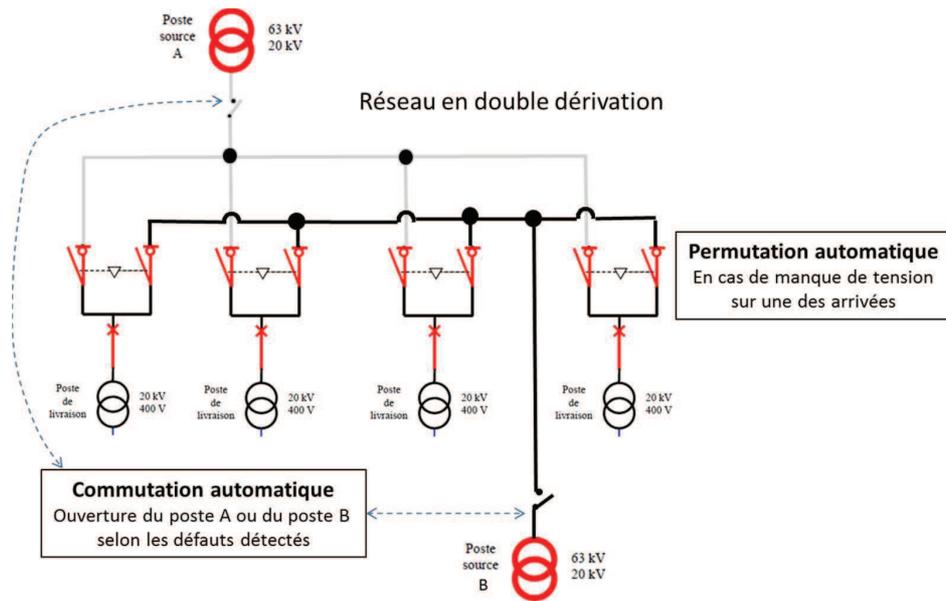


Figure 86 : Illustration d'une structure de réseau MT en double dérivation

Enfin, le réseau BT a une structure arborescente en antennes.

En conclusion, chaque réseau est inscrit dans son territoire, et répond aux contraintes de celui-ci par une adaptation de sa structure. Pour avoir une analyse plus détaillée, il faut choisir un territoire et décrire ses réseaux structurants dans une limite géographique donnée.

Annexe 4 : Description des modèles géomatiques et de leurs limites pour la cartographie des risques présentant un risque métier liés aux réseaux techniques pour la BSPP

Table 42 : Liste des modèles de la toolbox DEMOCRITE

Nom	Fonction
0TunnelsRoutiers	Identifier toutes les routes de niveau strictement négatif (hors voies piétonnes/cyclables). Créer les polygones de longueur et largeur correspondante aux tunnels.
1CroisementsRoutiersPonts	Identifier les croisements routiers avec ponts routiers. Créer les polygones de longueur et largeur correspondant à l'intersection de la route et du pont routier.
2PontFerroviaireSurRoute	Identifier les ponts ferroviaires au-dessus des routes (pont ferroviaire de tous types et non pas exclusivement de fret qui croisent les routes de niveau 0). Créer les polygones de longueur et largeur correspondant à l'intersection du pont ferroviaire et de la route.
3TunnelsFret	Représenter l'emprise des tunnels ferroviaires de fret. Créer les polygones de longueur et largeur correspondante aux tunnels.
4PontRoutierSurFret	Identifier les ponts routiers au-dessus des voies de fret. Créer les polygones de longueur et largeur correspondant à l'intersection de la route et du pont routier.
5AleaVehicules	Combiner les sorties entre les trois zones d'intérêts pour l'aléa embrasement de véhicule : les tunnels routiers (modèle 0), les croisements de routes avec pont routier (modèle 1) et les ponts ferroviaires au-dessus de route (modèle 2). Le résultat servira de couche de référence pour le modèle 7 qui analyse les risques professionnels liés aux réseaux techniques pour des interventions «embrasement de véhicules».
6AleaWagonsFret	Combiner les sorties entre les deux zones d'intérêts pour l'aléa embrasement de wagons de fret : les tunnels de fret (modèle 3) et les ponts routiers au-dessus de voies de fret (modèle 4). Le résultat servira de couche de référence pour le modèle qui analyse les risques professionnels liés aux réseaux techniques pour des interventions embrasement de wagons de fret.
7RM_vehicules	Attribuer à chaque zone sensible liée à l'aléa « embrasement de véhicules » la présence et le nombre de réseaux techniques.
8RM_wagons_fret	Attribuer à chaque zone sensible liée à l'aléa «embrasement de wagons de fret» la présence et le nombre de réseaux techniques.

Annexe 4 : Description des modèles géomatiques et de leurs limites pour la cartographie des risques présentant un risque métier liés aux réseaux techniques pour la BSPP

Les modèles 0 et 2 sont relativement simples car les localisations des objets recherchés existent déjà dans les données d'entrée, il suffit de reconstituer leur emprise. Ce n'est pas le cas pour les modèles 1 et 4, qui sont expliqués ci-dessous. Une fois les résultats des modèles 0 à 4 obtenus, les modèles 5 à 8 correspondent à des opérations d'intersections relativement classiques, et ils ne seront pas détaillés dans ce travail.

Modèle 1 Croisements Routiers Ponts

Ce modèle réalise deux sélections en parallèle du linéaire routier. Une première avec les routes non piétonnes au niveau du sol, une deuxième avec les routes (piétonnes ou non) de niveau strictement positif. Les linéaires qui se croisent sont sauvegardés, les autres éliminés des sélections. Sur la base du champ largeur et de la valeur par défaut définie par l'utilisateur, le champ « demi-largeur » est ajouté et calculé. Les deux sélections de linéaires sont transformées en surfaces par la création d'une zone tampon paramétrée sur le champ « demi-largeur » créé. Des exemples de zones tampon autour de linéaire sont visibles sur la Figure 87. Le modèle réalise ensuite l'intersection des deux couches de polygones pour avoir les emprises des zones de superposition de ponts routiers au-dessus des routes.

Discussion et limite du modèle 1 Croisements Routiers Ponts

La base de données IGN BDTPOPO v2 inclut des voies piétonnes comme les chemins, escaliers, sentiers et les pistes cyclables. Ces voies ne sont pas vecteurs d'aléa d'embranchement de véhicule. En revanche, si elles franchissent par pont une voie routière, leur chaussée peut abriter des réseaux techniques. Ce modèle propose donc d'éliminer de l'analyse les voies piétonnes de niveau 0, mais de prendre en compte celles de niveau strictement positif (moins de 1 % des voies routières de la BDTPOPO v2.1 IGN 2011). Pour avoir seulement les intersections avec franchissements et non les recouvrements partiels de voies routières, le modèle utilise l'intersection des linéaires et non pas l'intersection des surfaces routières. Il reconstruit les surfaces routières dans un deuxième temps, une fois les intersections identifiées.

Le modèle 1 Croisements Routiers Ponts utilise l'attribut « largeur » des routes carrossables. Or, la répartition de la nature des voies carrossables de largeur inconnue est constituée à 64 % de route à 1 chaussée (définie comme « Toutes routes goudronnées qui ne sont pas classées en route à 2 chaussées, quasi-autoroute ou autoroute se retrouvent dans cette classe » [IGN, BDTPOPO 2015]) et à 36 % de route empierrée (« Routes sommairement revêtues » [IGN, BDTPOPO 2015]). Cette dernière catégorie présente peu d'intérêts pour notre étude. Les statistiques de largeur de route sont donc réalisées sur les routes à une chaussée. La moyenne et l'écart type de largeur de ces routes sont de 4,5 m et 1,7 m respectivement. La valeur par défaut des routes de largeur inconnue sera donc estimée à 4,5 m, malgré un écart type relativement important. La non-exhaustivité des données sur la largeur des routes impactera forcément la qualité des résultats obtenus.

Annexe 4 : Description des modèles géomatiques et de leurs limites pour la cartographie des risques présentant un risque métier liés aux réseaux techniques pour la BSPP

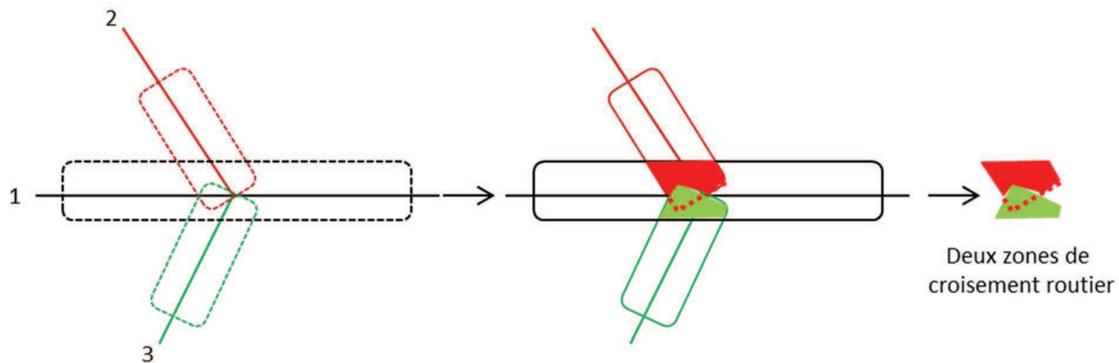


Figure 87 : Limite d'une opération de création de zones tampon autour des linéaires des routes, suivi d'une opération d'intersection

Une autre limite du modèle relative à la construction des données dans la BDTOPPO IGN est expliquée sur la Figure 87. Lorsque deux entités géographiques (numéros 2 et 3 sur la Figure 87) forment un pont continu au-dessus d'une route principale (numéro 1), le logiciel interprète deux croisements routiers. L'opération de reconstruction des routes crée deux zones tampon autour des entités 2 et 3, puis le modèle réalise deux intersections avec la route 1, ce qui produit deux zones d'étude au lieu d'une seule. Le nombre de croisements routiers obtenus est donc surestimé.

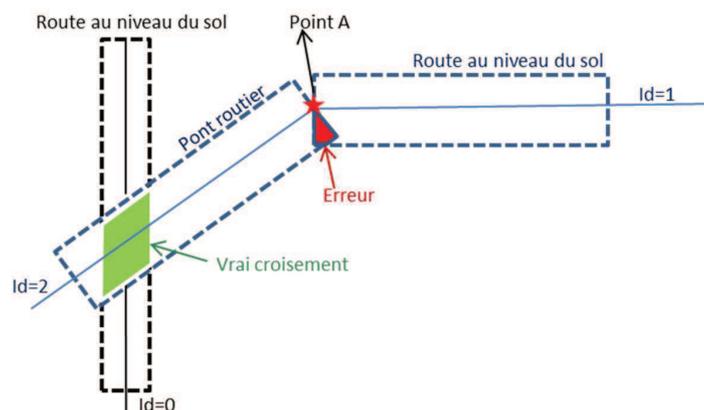


Figure 88: Erreur lors de l'opération de "bufferisation" suivi d'une opération d'intersection

La Figure 88 illustre un deuxième type d'erreur. Lorsqu'une voie au sol (Id=1) se prolonge en un pont routier (Id=2) au-dessus de la route numéro 0, l'intersection entre la voie au sol (Id=1) et le pont (Id=2) qui continue son axe routier au point A correspond à la définition dans le modèle d'un croisement avec pont routier (intersection de linéaires routiers avec un changement de niveau). Cette limite contribue à surestimer le nombre de zones de « croisement routier avec pont ».

Annexe 4 : Description des modèles géomatiques et de leurs limites pour la cartographie des risques présentant un risque métier liés aux réseaux techniques pour la BSPP

Modèle 4PontRoutierSurFret

Ce modèle identifie les ponts routiers au-dessus des voies de fret. Il sélectionne le linéaire des routes de niveau positif ou nul qui croisent le linéaire des voies de fret, puis exclue de cette sélection les routes qui sont en réalité des ponts ferrés, dont les linéaires sont décrits dans une troisième couche. Il ajoute le champ « demi-largeur » aux routes sélectionnées, dont la valeur par défaut est paramétrable par l'utilisateur mais proposée par défaut à 4,5m. Puis le modèle crée l'emprise de ces routes par une zone tampon. Le modèle construit en parallèle l'emprise des voies de fret selon la largeur par défaut de 6,3 m (standard de l'UIC), et croise ces deux couches de polygones pour obtenir les ponts routiers au-dessus des voies de fret.

Discussion et limite du modèle 4

Il existe une couche officielle de *SNCF Infra* qui répertorie les ponts routiers au-dessus des voies ferrées sous forme de points. Cependant, ces points ne croisent qu'en très faible proportion le linéaire des routes dont nous disposons. Au vu de la densité des routes et de la variété de leur nature, il est difficile d'identifier la route à proximité susceptible d'être le pont routier représenté par le point. Cette couche n'a donc pas un format adapté pour notre application. Une autre méthode a été choisie, n'utilisant que les voies routières, les voies de fret et le linéaire des ponts ferrés.

La méthode appliquée ici identifie plus de ponts routiers (1140 zones) que n'en contient la couche officielle (276 ponctuels). En premier lieu, l'éloignement entre les zones calculées et les points officiels de *SNCF Infra* est vérifié. Seulement 62 points officiels croisent les zones identifiées par le modèle 4, 122 points se situent à moins de 5 m des zones du modèle 4, 140 à moins de 10 m, 171 à moins de 20 m. Un problème de projection peut expliquer seulement une faible partie de ces différences de localisation des ponts routiers. Un autre facteur correspond à l'estimation de la largeur des voies routières (et donc à la longueur de la zone d'intérêt sur la voie de fret lors d'un croisement). On a vu précédemment que l'on commettait une erreur non négligeable sur ces largeurs de routes. Cependant ce facteur n'explique pas qu'à un rayon de 20 m autour des zones résultats, tous les croisements officiels n'aient pas été repérés. Une illustration de ce problème est visible sur la Figure 88 : un pont routier officiel est représenté à plus de 50 m d'une route sur laquelle le modèle a repéré un pont routier. Tous les points officiels se superposent avec les lignes de fret, mais ne semblent pas se superposer avec les voies routières renseignées dans la base de données disponible.

A défaut d'expliquer la différence de position des ponts routiers sur fret, le nombre de croisements peut au moins être comparé. Plusieurs facteurs expliquent le sur-nombre de zones calculées par rapport au nombre officiel de ponts routiers sur fret. Tout d'abord, lorsque plusieurs objets « route » se croisent au-dessus d'une ligne de fret, plusieurs polygones sont créés au-lieu d'une seule zone continue (situation analogue à celle de la Figure 87). De plus, la couche officielle de ponts routiers sur fret regroupe les voies routières (exemple : un point correspond à la fois aux ponts de l'A86 et aux voies d'insertion nord et sud) et les voies ferrées (plusieurs voies de fret peuvent se situer à proximité). Le modèle 4PontRoutierSurFret retient par conséquent plus de ponts routiers que le nombre officiel. La multiplication des

Annexe 4 : Description des modèles géomatiques et de leurs limites pour la cartographie des risques présentant un risque métier liés aux réseaux techniques pour la BSPP

résultats par zone géographique est illustrée sur la **Figure 89**. La **Figure 90** vient illustrer la vue aérienne de la zone cartographiée dans la **Figure 89**.

Un autre type d'erreur est généré par ce modèle avec des données de mauvaise qualité. En effet le niveau au sol des voies de fret est inconnu. Le modèle inclut donc des zones où il ne s'agit pas d'un pont routier sur fret, mais d'un passage à niveau ou encore d'un pont de fret sur route. Concernant les passages à niveau, l'emprise de croisement a une faible probabilité d'héberger un réseau technique : cette erreur est moindre lors du croisement entre zones d'intérêts et réseaux techniques. Concernant les ponts de fret sur routes, ils sont inclus dans le modèle « 2PontFerroviaireSurRoute ». Ces zones viennent donc en doublon du modèle. Une analyse *a posteriori* des résultats du modèle 4 avec ceux du modèle 2 permet de diminuer cette erreur.

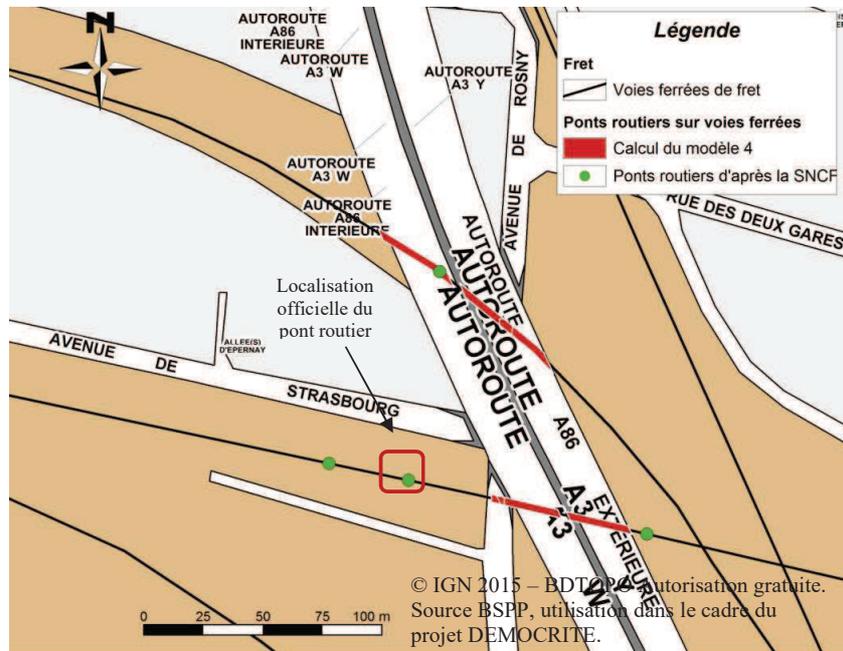
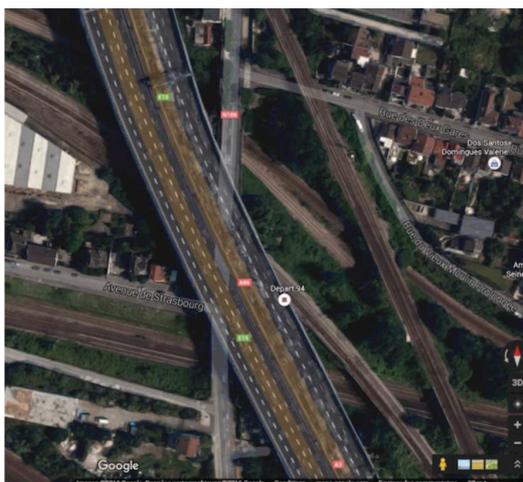


Figure 89: Illustration des différences entre les données officielles de ponts routiers sur fret (4 points) et les ponts routiers calculés (4 zones, 9 polygones)

Annexe 4 : Description des modèles géomatiques et de leurs limites pour la cartographie des risques présentant un risque métier liés aux réseaux techniques pour la BSPP



**Figure 90 : Capture écran de google Earth sur la même zone que la Figure 89.
Images © 2016 Google**

Annexe 5 : Description supplémentaire du réseau d'eau fictif utilisé dans le §3.5

Le réseau fictif utilisé est représenté sur la **Figure 91** et décrit dans la **Table 43**. La table suivante détaille les liens entre les équipements électro-dépendants et les réservoirs. Ces liens d'asservissement expliquent les variations de remplissage des différents réservoirs. Les courbes de remplissage d'une journée classique (sans panne d'électricité) sont présentées également dans cette annexe. Elles permettent d'identifier les réservoirs qui ont une faible marge de manœuvre, et la période de la journée où cette marge est la plus réduite. Les réservoirs sont, à ces moment-là, extrêmement sensibles à une panne de courant.

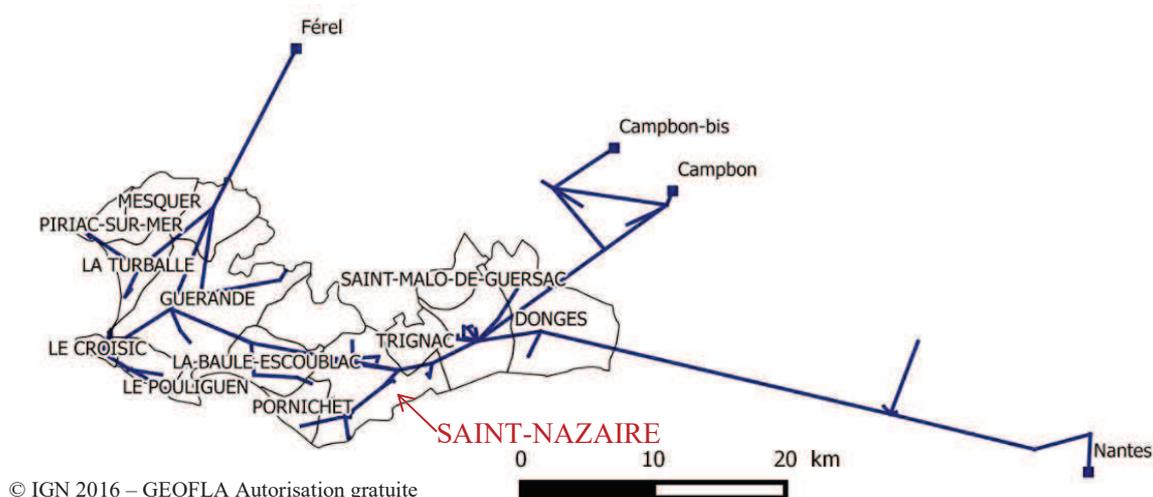


Figure 91: Communes privées d'électricité, sources d'approvisionnement et réseau fictif de transport d'eau

Table 43: Description des infrastructures et des équipements du réseau fictif

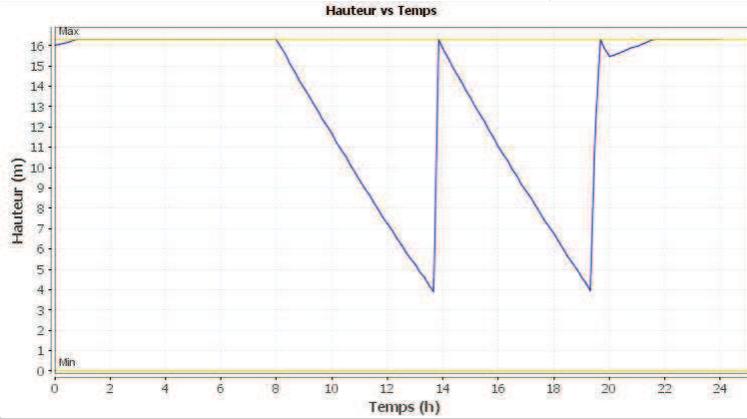
Tronçons	6236, représentant 796 km de linéaire
Nombre de mailles du réseau	799
Nombre d'équipements hydrauliques sur les tronçons	100
Dont :	
- Clapets	29
- Limiteurs de débit	21
- Pertes de charges singulières (obstacle à l'écoulement)	3
- Pompes	19
- Vannes motorisées	28
Nœuds (toutes catégories confondues)	5438
Nœuds consommateurs	1608 (95 000 m ³ consommés effectivement)
Réservoirs	45 (soit 85 500 m ³)
Dont :	
- Châteaux d'eau	17 (42 200 m ³) dont 4 reliés aux sources et hors zone de coupure d'électricité
- Réservoirs au sol	28 (43 300 m ³)
Sources	4 (Férel, Campbon, Campbon bis et Nantes)

Table 44: Synthèse des liens entre les équipements électro-dépendants et les réservoirs

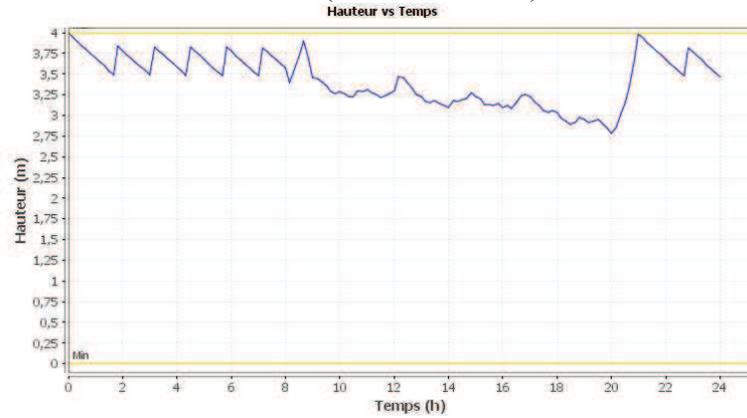
Château dans la zone de coupure	Lié à une pompe (PP) en amont pour son remplissage? A-t'il une vanne motorisée (VM) en amont ?	Alimente en aval une vanne motorisée ? Sur quel réservoir ?
C44941	PP_11647 VM_11774	VM_11818 sur le R91904
C14338	PP_11667 VM_11777	VM_11742 sur le R11028
C63304	VM_11734	
C07419	PP_11619	
C16037	PP_11617	VM_11795 R17301 VM_11689 R01611
C10121	PP_11615	VM_11738 Reservoir-4-groupes
C94937	PP_11610	VM_11732 R44954 VM_11730 R44952 VM_11728 R32842
C02306	PP_11663	VM_11716 groupe-de-3-12m VM_11712 regourpement-2-points VM_11708 R38824 VM_11704 R02937
C06606	PP_11661 VM_11808	VM_11698 R91207
C57275	PP_11625 VM_11799	VM_11694 R45258 VM_11797 groupe-de-4 VM_11779 R45289 VM_11724 R45295 VM_11720 groupe-3-points
C64142	PP_11665	
C61361	PP_11621	VM_11694 R45258 VM_11797 groupe-de-4 VM_11779 R45289 VM_11724 R45295 VM_11720 groupe-3-points
C94139	PP_11659	VM_11790 R51253

Table 45: Variations de hauteur d'eau dans les châteaux d'eau au cours d'une journée sans panne électrique (a)

C44941 (cuve de 1400 m³)



C14338 (cuve de 2500 m³)



C63304 (cuve de 300 m³)

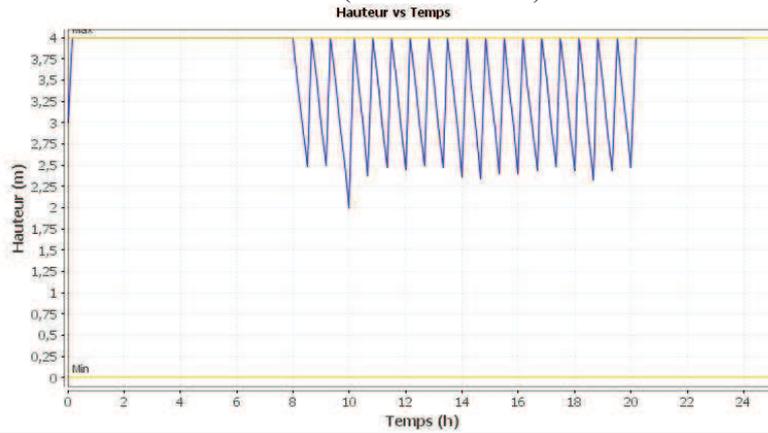
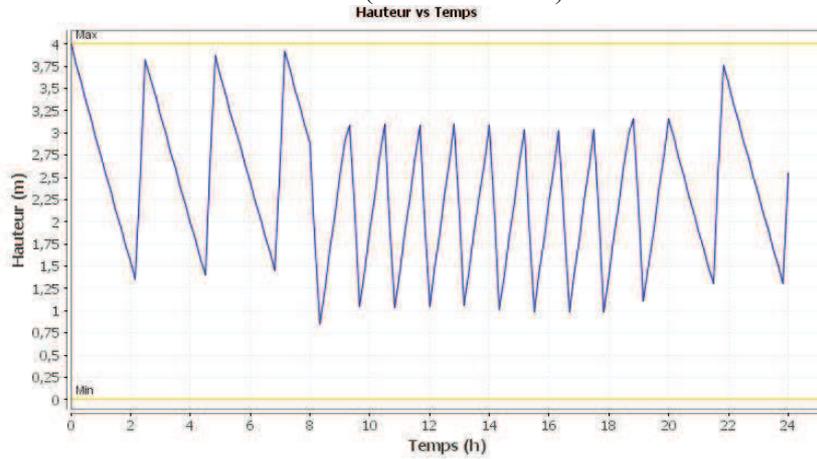
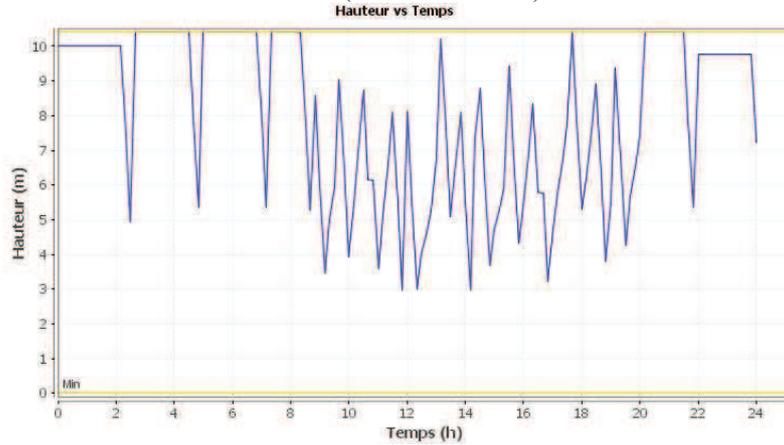


Table 46: Variations de hauteur d'eau dans les châteaux d'eau au cours d'une journée sans panne électrique (b)

C07419 (cuve de 500 m³)



C16037 (cuve de 740 m³)



C10121 (cuve de 580 m³)

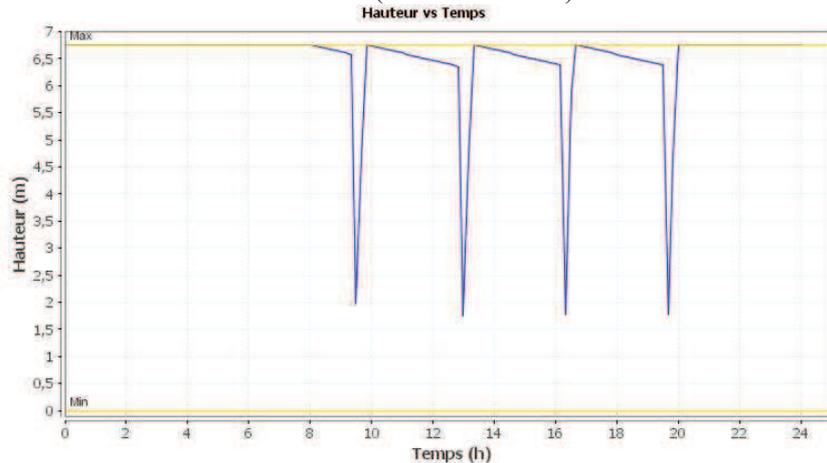
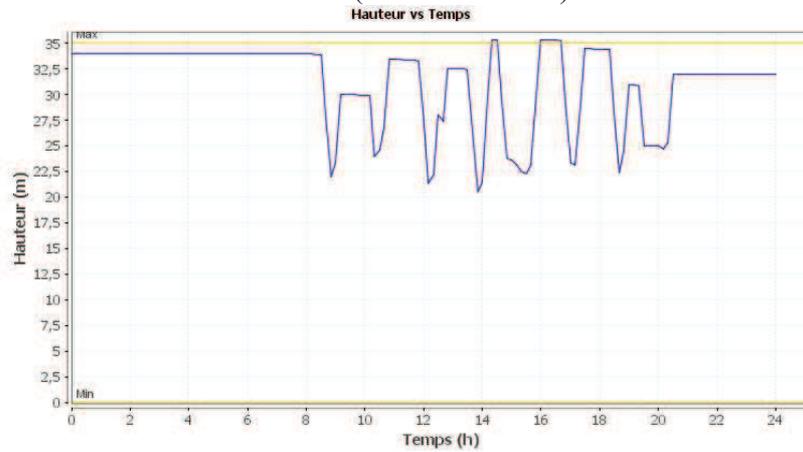
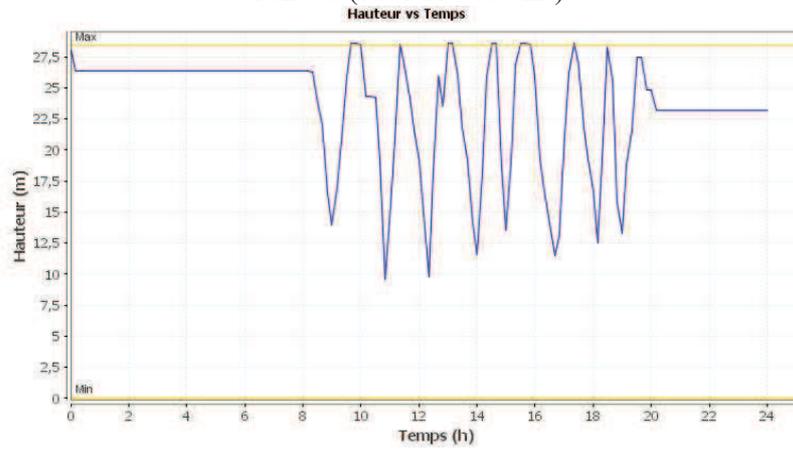


Table 47: Variations de hauteur d'eau dans les châteaux d'eau au cours d'une journée sans panne électrique (c)

C94937 (cuve de 1465 m³)



C02306 (cuve de 3400 m³)



C06606 (cuve de 3650 m³)

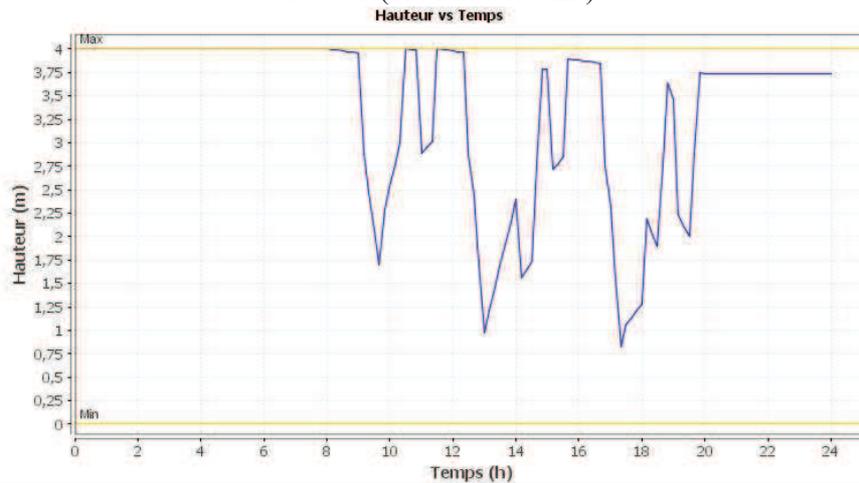
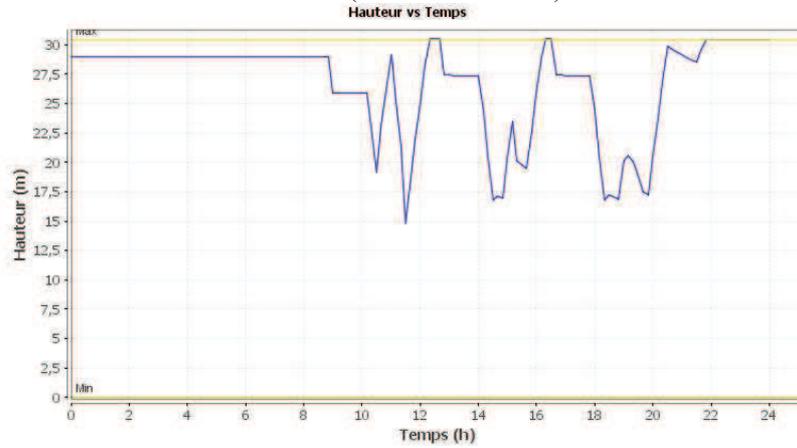
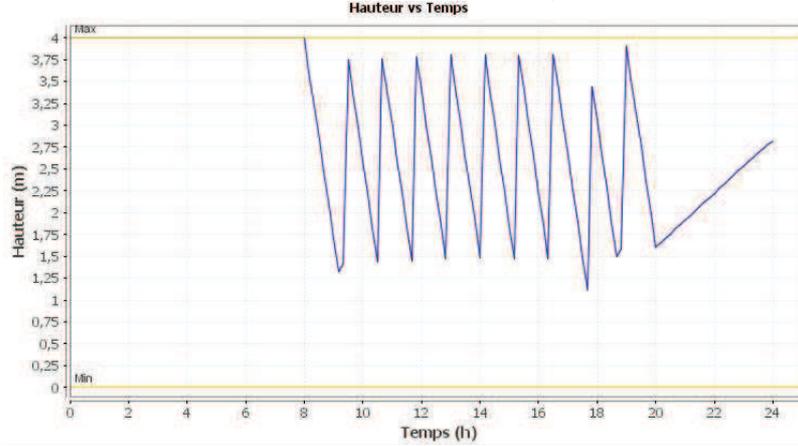


Table 48 : Variations de hauteur d'eau dans les châteaux d'eau au cours d'une journée sans panne électrique (d)

C57275 (cuve de 7200 m³)



C64142 (cuve de 265 m³)



C61361 (cuve de 1770 m³)

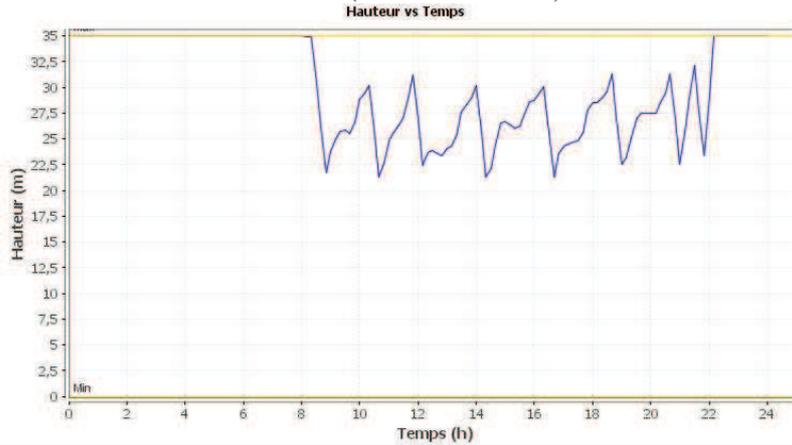


Table 49: Variations de hauteur d'eau dans les châteaux d'eau au cours d'une journée sans panne électrique (e)

C94139 (cuve de 814 m³)

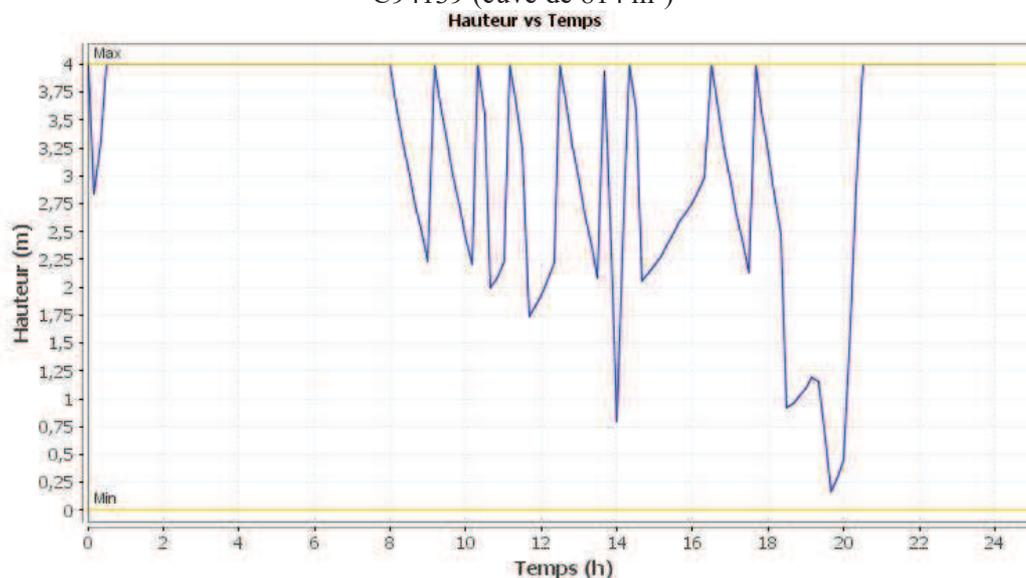


Table 50: Description des pompes impactées par la coupure d'électricité

Identifiant	Alimente le réservoir (C= Château d'eau, R= Réservoir)	Puissance(kW)
PP_11663	C02306	1000
PP_11661	C06606	1000
PP_11619	C07419	180
PP_11615	C10121	1000
PP_11667	C14338	400
PP_11617	C16037	1000
PP_11647	C44941	1000
PP_11625	C57275	1000
PP_11621	C61361	1000
PP_11665	C64142	30
PP_11659	C94139	400
PP_11610	C94937	850
PP_11806	R91524	300
PP_11756	Réservoir "regroupement2points"	300
PP_11748	Réservoir "regroupement-2-points"	500

Annexe 5 : Description supplémentaire du réseau d'eau fictif utilisé dans le §3.5

Table 51: Description des vannes motorisées et de leur asservissement

Identifiant	Liée au remplissage du réservoir :	Château en amont du réservoir
VM_11716	groupe-de-3-12m	C02306
VM_11704	R02937	C02306
VM_11708	R38824	C02306
VM_11712	regroupement-2-points	C02306
VM_11808	C06606	C06606
VM_11698	R91207	C06606
VM_11738	Reservoir-4-groupes	C10121
VM_11777	C14338	C14338
VM_11742	R11028	C14338
VM_11689	R01611	C16037
VM_11795	R17301	C16037
VM_11774	C44941	C44941
VM_11818	R91904	C44941 et source Nantes
VM_11799	C57275	C57275
VM_11694	R45258	C57275
VM_11720	groupe-3-points	C57275 et C61361
VM_11797	groupe-de-4	C57275 et C61361
VM_11779	R45289	C57275 et C61361
VM_11724	R45295	C57275 et C61361
VM_11734	C63304	C63304
VM_11790	R51253	C94139
VM_11728	R32842	C94937
VM_11730	R44952	C94937
VM_11732	R44954	C94937
VM_11802	groupe-de-2-8m	Sources Nantes et Campbon
VM_11691	R36131	Sources Nantes et Campbon
VM_11693	R51232	Sources Nantes et Campbon
VM_11788	R51233	Sources Nantes et Campbon

Annexe 5 : Description supplémentaire du réseau d'eau fictif utilisé dans le §3.5

Table 52: Autonomies des châteaux d'eau pour le scénario 1 bis (VM fermées)

Château	Heure de vidange totale	Durée d'autonomie (Repère = 7 :30)
C44941 (cuve de 1400 m ³)	11 :50	4 :20
C14338 (cuve de 2500 m ³)	11 :30	4 :00
C63304 (cuve de 300 m ³)	9 :20	1 :50
C07419 (cuve de 500 m ³)	8 :30	1 :00
C16037 (cuve de 740 m ³)	Aucune heure	> 13 :15
C10121 (cuve de 580 m ³)	Aucune heure	> 13 :15
C94937 (cuve de 1465 m ³)	Aucune heure	> 13 :15
C02306 (cuve de 3400 m ³)	Aucune heure	> 13 :15
C06606 (cuve de 3650 m ³)	Aucune heure	> 13 :15
C57275 (cuve de 7200 m ³)	Aucune heure	> 13 :15
C64142 (cuve de 265 m ³)	9 :40	2 :10
C61361 (cuve de 1770 m ³)	Aucune heure	> 13 :15
C94139 (cuve de 814 m ³)	10 :00	2 :30

Table 53: Autonomies des réservoirs pour le scénario 1 bis (VM fermées)

Réservoir au sol	Heure de vidange totale	Autonomie en heure (référence 7:30)
11028	08:10	0:40
45289	08:40	1:10
02937	08:40	1:10
45295	08:50	1:20
regroupement-2-points	09:20	1:50
91524	09:20	1:50
regroupement-2-points	09:50	2:20
44952	09:50	2:20
45258	09:50	2:20
17301	10:10	2:40
01611	10:20	2:50
38824	10:20	2:50
groupe-de-4	10:30	3:00
groupe-3-points	10:40	3:10
groupe-de-2-8m	10:50	3:20
44954	11:00	3:30
51253	11:10	3:40
91904	11:30	4:00
Reservoir-4-groupes	11:30	4:00
51233	11:50	4:20
32842	12:10	4:40
groupe-de-3-12m	12:50	5:20
91207	13:10	>5:40
regroupement2points	-	>5:50
regroupement-2-points-H7	-	>5:50
36131	-	>5:50
38022	-	>5:50
51232	-	>5:50

Table 54: Autonomie des châteaux d'eau sur le scénario 1ter (VM non fonctionnelles pendant 1 heure, pompes indisponibles pendant 24 heures)

Nom	Heure de vidange totale	Autonomie vis à vis de 7h30 (scénario 1 ter)	Pour comparaison : Durée d'autonomie du scénario 1 bis	Gain d'autonomie
C44941 (cuve de 1400 m ³)	14:20	06:50	4 :20	2 :30
C14338 (cuve de 2500 m ³)	11:00	03:30	4 :00	-0 :30
C63304 (cuve de 300 m ³)	11:10	03:40	1 :50	1 :50
C07419 (cuve de 500 m ³)	08:30	01:00	1 :00	0 :00
C16037 (cuve de 740 m ³)	10:40	03:10	> 13 :15	-10 :00
C10121 (cuve de 580 m ³)	12:20	04:50	> 13 :15	-10 :00
C94937 (cuve de 1465 m ³)	10:40	03:10	> 13 :15	-10 :00
C02306 (cuve de 3400 m ³)	10:00	02:30	> 13 :15	-10 :00
C06606 (cuve de 3650 m ³)	17:50	10:20	> 13 :15	-10 :00
C57275 (cuve de 7200 m ³)	13:20	05:50	> 13 :15	-10 :00
C64142 (cuve de 265 m ³)	09:40	02:10	2 :10	0 :00
C61361 (cuve de 1770 m ³)	10:40	03:10	> 13 :15	-10 :00
C94139 (cuve de 814 m ³)	11:10	03:40	2 :30	1 :10

Table 55: Autonomie des réservoirs sur le scénario 1ter (VM non fonctionnelles pendant 1 heure, pompes indisponibles pendant 24 heures)

Id	Heure de vidange totale	Autonomie vis-à-vis de 7h30	Autonomie gagnée vis-à-vis du scénario 1 bis
groupe-3-points	14:00	06:30	03:20
groupe-de-2-8m	15:30	08:00	04:40
groupe-de-3-12m	16:00	08:30	03:10
groupe-de-4	13:10	05:40	02:40
regroupement-2-points	11:00	03:30	01:40
regroupement2points	18:30	11:00	05:10
regroupement-2-points	18:30	11:00	08:40
regroupement-2-points-H7	18:30	11:00	05:10
Reservoir-4-groupes	15:10	07:40	03:40
44952	12:20	04:50	02:30
44954	12:30	05:00	01:30
45258	14:10	06:40	04:20
45289	11:30	04:00	02:50
45295	08:40	01:10	-0:10
36131	18:30	11:00	05:10
38022	18:30	11:00	05:10
17301	11:10	03:40	01:00
01611	11:40	04:10	01:20
91207	18:00	10:30	04:50
91524	09:30	02:00	00:10
02937	10:30	03:00	01:50
38824	12:00	04:30	01:40
11028	08:10	00:40	00:00
32842	14:20	06:50	02:10
91904	14:20	06:50	02:50
51232	14:20	06:50	01:00
51233	18:10	10:40	06:20
51253	14:50	07:20	03:40

Annexe 6 : Application de la méthode d'évaluation de la vulnérabilité et de la résilience au réseau fictif du §3.5

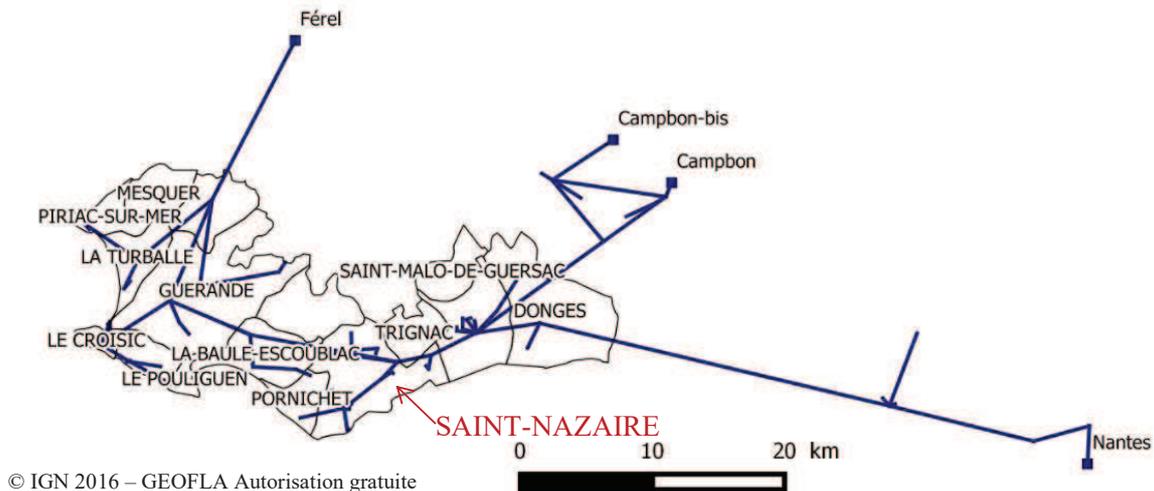


Figure 92: Communes privées d'électricité, sources d'approvisionnement et réseau fictif de transport d'eau

La première difficulté consiste à définir le territoire selon la compétence du gestionnaire. Ici les sources Férel, Campbon et Campbon bis appartiennent au gestionnaire, mais le réservoir de Nantes semble être un réservoir complémentaire géré par un autre gestionnaire. De plus, ce réseau étant fictif, nous n'avons pas inclus dans l'étude les infrastructures en dehors du territoire (hormis les sources). Nous avons donc 45 réservoirs et châteaux d'eau, et 3 sources en gestion.

Nous avons vu précédemment qu'à chaque réservoir était associé au moins un équipement électro-dépendant (vannes motorisées ou pompes). Aux sources d'eau sont associées les fonctions « pomper » et « traiter ». Nous négligerons sur ce réseau fictif les organes de contrôle à distance (fonction « contrôler »). Nous avons également 45 infrastructures remplissant la fonction « stocker ».

Le scénario 1ter suppose une coupure d'électricité de l'ordre de la journée sur l'ensemble des infrastructures de stockage, avec un rétablissement du fonctionnement des vannes motorisées par une gestion manuelle au bout d'une heure.

Evaluation de la vulnérabilité :

Au niveau des infrastructures, il n'y a aucun dommage matériel engendré par le scénario. On a donc pour chaque réservoir R_i une vulnérabilité de $V_{\text{infrastructure}}(R_i)=1$ pour $i \in [1,45]$ et de même pour les trois sources $V_{\text{infrastructure}}(S_i)=1$ pour $i \in [1,3]$. Donc quand on fait le bilan de la vulnérabilité physique des infrastructures, moins de 10% sont endommagées et $V_{\text{physique, système}}=1$. Pour rappel, ce bilan d'analyse de vulnérabilité ne sert pas dans la suite de l'analyse, il s'agit simplement d'un indicateur de description du réseau face à cette vignette. Toujours au niveau des infrastructures, l'analyse de la vulnérabilité fonctionnelle montre que l'ensemble des réservoirs est touché par la panne de courant. Leur fonction est dégradée, car ils peuvent distribuer l'eau qu'ils ont en stock mais ils ne peuvent plus se réapprovisionner.

Annexe 6 : Application de la méthode d'évaluation de la vulnérabilité et de la résilience au réseau fictif du §3.5

On a donc pour chaque réservoir R_i une vulnérabilité de $V_{\text{ressource, fonctionnelle}}(R_i)=2$ pour $i \in [1,45]$, mais pour les trois sources, on a $V_{\text{ressource, fonctionnelle}}(S_i)=1$ pour $i \in [1,3]$.

Pour faire le bilan de la vulnérabilité fonctionnelle du réseau, il faut décomposer l'analyse par fonction.

- Les fonctions « pomper » et « traiter » ne sont pas touchées ici, car elles sont réalisées par des infrastructures situées en dehors de la coupure d'électricité. Elles sont donc toujours fonctionnelles et on a $V(\text{« pomper »})_{\text{fonctionnelle}}=1$ et $V(\text{« traiter »})_{\text{fonctionnelle}}=1$.
- La fonction stocker est, elle, partiellement disponible à l'échelle du système et $V(\text{« stocker »})_{\text{fonctionnelle}}=2$.

Comme une des fonctions du système est partiellement indisponible, nous avons la vulnérabilité fonctionnelle du système qui vaut pour cette vignette $V_{\text{système, fonctionnelle}}=2$

Il s'agit maintenant de faire le bilan, infrastructure par infrastructure de leur vulnérabilité face à la vignette considérée en appliquant la formule suivante :

$$V_{\text{infrastructure}} = \text{Min}(V_{\text{ressource, fonctionnelle}} ; V_{\text{physique}})$$

On obtient donc une vulnérabilité à l'échelle de l'infrastructure qui vaut sur cette vignette : pour chaque réservoir R_i $V_{\text{infrastructure}}(R_i)=2$ pour $i \in [1,45]$, et pour les trois sources $V_{\text{infrastructure}}(S_i)=1$ pour $i \in [1,3]$.

Maintenant que l'on connaît la vulnérabilité de chaque infrastructure, il s'agit d'étudier la vulnérabilité systémique en utilisant le modèle hydraulique de ce réseau. Nous savons que les équipes d'intervention sont mobilisées en une heure pour manipuler les vannes. L'évolution passive du système s'arrête donc au bout d'une heure. A ce moment là, une partie des points de consommation n'a déjà plus d'eau. Cela signifie qu'en termes de performance de pression, le système est sous le seuil de défaillance fixé à 1 bar et $V_{\text{système, pression}}=3$. Pour rappel, le seuil de performance est fixé à 2 bar. En revanche, aucun problème sanitaire n'est envisagé sur cette vignette et $V_{\text{système, qualité}}=1$.

Pour conclure sur la vulnérabilité du système, on utilise la formule suivante :

$$V_{\text{système}} = \text{Max}(V_{\text{système, qualité}} ; V_{\text{système, pression}}) = 3$$

En résumé, les signatures de vulnérabilité sont les suivantes :

$(V_{\text{infrastructure}}(R_i)=1$ pour $i \in [1,45]$ $V_{\text{infrastructure}}(S_i)=1$ pour $i \in [1,3]$, $V_{\text{ressource, fonctionnelle}}(R_i)=2$ pour $i \in [1,45]$ $V_{\text{ressource, fonctionnelle}}(S_i)=1$ pour $i \in [1,3]$)

$(V_{\text{physique, système}}, V(\text{« pomper »})_{\text{fonctionnelle}}=1$ $V(\text{« traiter »})_{\text{fonctionnelle}}=1$

$V(\text{« stocker »})_{\text{fonctionnelle}}=2)$

$(V_{\text{système, pression}}=3, V_{\text{système, qualité}}=1)$

Grâce aux signatures suivantes, l'observateur sait en un coup d'œil que :

- cette vignette n'engendre pas de dégâts matériels,
- elle dégrade seulement partiellement par rupture de service support le fonctionnement des infrastructures qui remplissent la fonction « pomper »,
- et le système est très vulnérable à ces dégradations partielles : il y aura en moins d'une heure (délai d'intervention) des coupures d'eau pour les usagers.

Il s'agit maintenant de savoir si le système est résilient face à cette vignette.

Annexe 6 : Application de la méthode d'évaluation de la vulnérabilité et de la résilience au réseau fictif du §3.5

Evaluation de la résilience :

La capacité d'absorption du système est mauvaise car la vulnérabilité est élevée. On a donc $R_{AB}=1$.

Les questionnaires d'évaluation de la capacité d'adaptation sont remplis ci-dessous.

Table 56 : Questionnaire d'évaluation de la capacité d'adaptation *a priori* sur l'aspect détection

Question (Non Résilient: 1, Résilient: 3)		1	2	3
a	<p>Il faut établir en premier la capacité de détection de la perte de performance du réseau face à la vignette considérée.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Il existe des détecteurs capables d'informer en temps réel la salle de gestion d'une perte de performance. L'instant de détection précède donc l'instant de défaillance → R_{AD} (Détection interne)=3 • Il existe quelques détecteurs, mais le délai de détection est extrêmement variable et difficile à évaluer → R_{AD} (Détection interne)=2 • Il existe quelques détecteurs, mais l'instant de détection suit l'instant de défaillance, ou il n'existe pas de détecteur en interne → R_{AD} (Détection interne)=1 			X

Sur la table ci-dessus, la détection de la panne d'électricité se fait certes suite à la coupure électrique, mais elle se fait avant la défaillance d'une infrastructure (les réservoirs ont un stock, même s'il est faible). On a donc R_{AD} (Détection interne)=3.

Sur la table ci-dessous, il existe un moyen de manipuler les vannes motorisées. Mais nous avons vu sur les cartes de résultat que cette action ne faisait qu'enrayer la dégradation de service, mais ne permettait pas aux usagers de retrouver de l'eau au cours de la journée (nous supposons pour l'exercice que $t_{acceptable}=1$ jour). On a donc $R_{AD\ technique}$ (Efficacité)= 2.

L'activation des vannes est considérée comme une action classique pour les besoins de l'exemple sur ce réseau fictif : $R_{AD\ technique}$ (Préparation)=3. Nous avons vu précédemment que pour les réservoirs (hors châteaux d'eau), l'activation des vannes après 1 heure a fait gagner en moyenne 3h d'autonomie par rapport au scénario 1 bis (vannes fermées). Cependant si l'on considère un temps de « réparation » égal au temps de coupure d'électricité (supérieure à la journée ici), ce délai d'autonomie supplémentaire est inférieur à la moitié du délai de réparation. On a donc $R_{AD\ technique}$ (Ressources)=1.

On obtient alors la signature de la capacité d'adaptation technique du système et sa note

$$(R_{AD\ technique} (Efficacité)= 2 \ R_{AD\ technique}(Préparation)=3 \ R_{AD\ technique} (Ressources)=1)$$

$$R_{AD\ technique} = \text{MIN}[R_{AD\ technique} (Efficacité), R_{AD\ technique}(Préparation), R_{AD\ technique} (Ressources)]=1$$

Une limite de ce questionnaire apparaît tout du moins ici : estimer la durée de la réparation d'une cause qui n'est pas de la responsabilité de l'opérateur n'est pas possible. La durée de la panne doit donc bien être spécifiée dans la vignette.

Annexe 6 : Application de la méthode d'évaluation de la vulnérabilité et de la résilience au réseau fictif du §3.5

Table 57 : Questionnaire d'évaluation de la capacité d'adaptation technique *a priori* hors aspect détection

	Question (Non Résilient: 1, Résilient: 3)	1	2	3
b	<p>Evaluation de la capacité technique d'adaptation par vignette :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Il existe une reconfiguration du réseau (par ouverture de vannes par exemple) et cette solution permet au système de retrouver une performance au moins égale au seuil contractuel avant $t_{acceptable}$ → $R_{AD\ technique} (Efficacité)= 3$ • Il existe une reconfiguration du réseau mais cette solution implique une dégradation de service (en quantité ou qualité) → $R_{AD\ technique} (Efficacité)= 2$ • Il n'existe pas de reconfiguration du réseau → $R_{AD\ technique} (Efficacité)= 1$ 		X	
c	<p>Si $R_{AD\ technique} (Efficacité) \geq 2$: Evaluation de la préparation technique à utiliser cette reconfiguration :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Existe-t-il une procédure dédiée explicitant cette reconfiguration d'urgence (planification) ? • Cette reconfiguration a-t-elle été testée ? <p>Si les deux points existent → $R_{AD\ technique}(Préparation)=3$, Si un des points existe → $R_{AD\ technique}(Préparation)=2$, Si aucun point n'existe → $R_{AD\ technique}(Préparation)=1$</p>			X
d	<p>Si $R_{AD\ technique} (Efficacité) \geq 2$: Evaluation des ressources disponibles au sein du réseau technique pour mettre en place la reconfiguration. Quel délai supplémentaire de résistance cette solution apporte-t-elle?</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cette solution assure une performance minimale pour une durée supérieure au délai d'implémentation des solutions de réparation à long terme. → $R_{AD\ technique} (Ressources)=3$ • Cette solution assure une performance minimale pour une durée supérieure à la moitié du délai d'implémentation des solutions de réparation à long terme. → $R_{AD\ technique} (Ressources)=2$ • Cette solution ne peut pas réduire de façon significative la défaillance du réseau → $R_{AD\ technique} (Ressources)=1$ 		X	
	<p>$R_{AD\ technique}$ signature: et $R_{AD\ technique} = \text{MIN}[R_{AD\ technique} (Efficacité), R_{AD\ technique}(Préparation), R_{AD\ technique} (Ressources)]$</p>			

Enfin, le questionnaire ci-dessous évalue la préparation de l'opérateur à distribuer une solution alternative qui est ici de distribuer les bouteilles d'eau. Nous supposons là encore pour les besoins de l'illustration qu'il s'agit d'une entreprise modèle : Elle possède une procédure dédiée à la distribution de bouteilles et un plan de communication aux consommateurs, ainsi qu'un stock de bouteilles équivalent à la consommation d'une journée. On a alors :

$R_{AD\ organisation}(Préparation)=2$ et $R_{AD\ organisation} (Ressources)=2$ et donc $R_{AD\ organisation} =2$.

Annexe 6 : Application de la méthode d'évaluation de la vulnérabilité et de la résilience au réseau fictif du §3.5

Table 58 : Questionnaire d'évaluation de la capacité d'adaptation organisationnelle, a priori, à fournir une solution alternative au service contractuellement prévu

	Question (Non Résilient: 1, Résilient: 3)	1	2	3
e	<p>Si la vignette implique une défaillance de service, évaluation de la préparation de l'organisation à utiliser cette solution (distribuer des bouteilles ici) :</p> <ul style="list-style-type: none"> Existe-t-il une procédure dédiée à la distribution de bouteilles dans la planification des actions d'urgence ? Existe-t-il un plan de communication aux consommateurs? <p>S'il existe au moins un point → $R_{AD\ organisation}(Préparation)=2$ Si aucun point n'est disponible → $R_{AD\ organisation}(Préparation)=1$</p>		X	
f	<p>Si la vignette implique une défaillance de service, évaluation des ressources disponibles au sein de l'organisation pour mettre en place ce service non-nominal. Quel délai supplémentaire de compensation cette solution apporte-t-elle ? Ici nous considérons un stock de bouteilles d'eau, en tenant compte de la possibilité de réapprovisionnement.</p> <ul style="list-style-type: none"> Le stock peut satisfaire une consommation personnelle (hors industrie) d'au moins la moitié du délai d'implémentation des solutions de réparation à long terme → $R_{AD\ organisation}(Ressources)=2$ Le stock ne peut pas compenser sur une durée significative la défaillance du réseau → $R_{AD\ organisation}(Ressources)=1$ 		X	
	<p>$R_{AD\ organisation\ signature}$:</p> <p>$R_{AD\ organisation} = \text{MIN}[R_{AD\ organisation}(Préparation), R_{AD\ organisation}(Ressources)]$</p>		X	

Enfin la capacité de réparation est égale à $R_{RE}=3$ car il n'y a pas de réparation matérielle à faire et donc le coût est nul. Le délai de réparation est égal à la durée de la coupure électrique, estimée à une journée ici. Une journée de coupure d'eau reste un délai acceptable car ce n'est pas défini comme une crise au sens de la sécurité civile.

Table 59 : Evaluation de la capacité de réparation

	Question (Non Résilient: 1, Résilient: 3)	1	2	3
g	<ul style="list-style-type: none"> Existe-t-il une solution de réparation acceptable en termes de coût dans un délai acceptable $t_{fin\ de\ réparation} < t_{acceptable}$? → $R_{RE}=3$ Existe-t-il une solution acceptable en termes de coût mais $t_{fin\ de\ réparation} > t_{acceptable}$? → $R_{RE}=2$ Il n'existe pas de solution financièrement acceptable → $R_{RE}=1$ 			X

Conclusion sur l'évaluation de la résilience :

- Capacité d'absorption : $R_{AB}=1$
- Capacité d'adaptation :
 - $R_{AD}(Détection\ interne)=3$
 - $(R_{AD\ technique}(Efficacité)=2\ R_{AD\ technique}(Préparation)=3\ R_{AD\ technique}(Ressources)=1)$ et $R_{AD\ technique}=1$
 - $R_{AD\ organisation}=2$
- Capacité de réparation: $R_{RE}=3$

Annexe 6 : Application de la méthode d'évaluation de la vulnérabilité et de la résilience au réseau fictif du §3.5

Sur cette signature, il apparaît que la capacité d'absorption (vulnérabilité systémique) est un point faible important de la résilience du système face à cette vignette. L'autre axe d'amélioration correspond à la faible efficacité de la réaction d'adaptation du système. La manipulation des vannes ne fait pas gagner un délai significatif d'accessibilité à l'eau au vu de la durée de la panne électrique. Ces deux points constituent des axes d'amélioration pour les capacités de résilience. La capacité de réparation du système est bonne face à cette vignette de coupure d'électricité.

Comme l'on pouvait s'y attendre sur une coupure aussi courte, cette vignette ne correspond pas à une crise pour l'opérateur de réseau d'eau (et donc *a fortiori* pour la sécurité civile), car elle correspond à des procédures établies, et que la capacité de réparation est bonne. Néanmoins, c'est en répétant cette évaluation sur les vignettes avec des coupures d'électricité de durées différentes et des moments de déclenchement différents que l'on pourra déterminer le seuil de crise pour l'opérateur d'eau et pour la sécurité civile face à une coupure d'électricité. L'analyse précédente a montré que la capacité d'absorption du réseau d'eau était très faible, et que la réaction du système ne faisait pas gagner un temps significatif d'autonomie en eau face à cette coupure d'électricité. La capacité de réparation est entièrement corrélée avec le facteur de durée de la panne électrique car le temps de réparation est égal à cette durée. Si l'on estime qu'une coupure d'eau sur un territoire étendu est une crise de sécurité civile si elle dure plus de trois jours, alors un scénario de coupure d'électricité sera une crise avec effet cascade sur le réseau d'eau s'il dure plus de trois jours.

Annexe 7 : Lettre de recommandation de la Brigade de Sapeurs-Pompiers de Paris pour le travail accompli par A. Grangeat dans le cadre du projet DEMOCRITE

Annexe 7 : Lettre de recommandation de la Brigade de Sapeurs-Pompiers de Paris pour le travail accompli par A. Grangeat dans le cadre du projet DEMOCRITE



Paris, le 20 septembre 2016



ETAT-MAJOR

Le lieutenant-colonel Paul-Marie VILBÉ
chef de la division emploi par suppléance
de la brigade de sapeurs-pompiers de Paris

Objet : lettre de recommandation.

Madame, Monsieur,

La Brigade de sapeurs-pompiers de Paris (BSPP) est une unité militaire créée en 1811 par Napoléon, qui assure la défense d'une importante mégapole : Paris et 123 communes. Forte de 8000 personnes elle doit garantir au quotidien une réponse opérationnelle permettant de protéger 9 millions de personnes, ainsi que leurs biens et leur environnement.

Afin de vérifier si cette réponse opérationnelle est adaptée à l'évolution du bassin de risques, la BSPP participe à un projet de l'agence nationale de recherche (ANR) intitulé DEMOCRITE (démonstrateur d'un moteur d'analyse et de couverture des risques sur un territoire) dont la coordination est assurée par une équipe scientifique du CEA. Il a pour objectif de rechercher de nouveaux modèles scientifiques et/ou des technologies innovants susceptibles d'améliorer l'analyse des risques et la couverture opérationnelle.

Ces travaux portent actuellement sur :

- ✓ l'extrapolation prédictive de l'activité opérationnelle de la BSPP ;
- ✓ la modélisation de la « sensibilité » aux risques d'un territoire défini ou simulé ;
- ✓ la mise en avant de la « mémoire » des interventions BSPP en exploitant au mieux l'entrepôt de données et le système d'information géographique (SIG).

Ces études s'inscrivent dans une démarche innovante de recherche et de développement (R&D) afin d'améliorer l'aide à la décision stratégique au sein de la BSPP. L'objectif est d'acquérir, à terme, des outils adaptés au pilotage et à la conduite de notre organisation opérationnelle.

Annexe 7 : Lettre de recommandation de la Brigade de Sapeurs-Pompiers de Paris pour le travail accompli par A. Grangeat dans le cadre du projet DEMOCRITE

C'est dans ce cadre que j'ai fait la connaissance de madame Amélie GRANGEAT.

Doctore, elle s'est particulièrement illustrée lors de ses travaux de modélisation des vulnérabilités et de mise en évidence des effets dominos par sa capacité à comprendre nos besoins et les problématiques posées.

Au-delà de ses compétences scientifiques remarquées, madame Amélie GRANGEAT est dotée d'un état d'esprit digne d'une future cheffe de projet susceptible de :

- ✓ s'insérer facilement dans un groupe projet voir de le piloter ;
- ✓ synthétiser des travaux et en faire montre avec aisance auprès de ses pairs ;
- ✓ disposer des qualités humaines essentielles afin d'aboutir un projet.

D'ores et déjà, elle dispose des capacités nécessaires à soutenir un projet, le développer et en faire montre à ces supérieurs (un conseil d'administration, un collègue scientifique etc.).

Notre métier est profondément tourné vers l'action. Comme toute unité militaire, nous disposons d'une devise : « Sauver ou Périr ». Elle traduit notre nécessaire dévouement dans notre mission. La confiance et l'esprit de corps sont des valeurs morales essentielles à notre engagement sur opération, elles le sont aussi dans le cadre des projets que nous réalisons.

A cette occasion, il m'est permis de vous préciser, Madame, Monsieur, que si je devais de nouveau choisir madame Amélie GRANGEAT au sein de mon équipe projet, je le ferai sans la moindre hésitation.

Lieutenant-colonel Paul-Marie VILBE
chef du bureau planification-opérationnelle
Brigade de sapeurs-pompiers de Paris

Annexe 8 : CIPRNet Young CRITIS Award 2016

Diplôme obtenu pour la présentation de l'article :

Grangeat, A. Sina J. Rosato V. Bony, A., Theocharidou M. (2016) Human vulnerability mapping facing critical service disruptions for crisis managers.

à la 11th International Conference CRITIS (Critical Information Infrastructures Security), October 2016, Paris. La conférence était partiellement financée par le projet CIPRNet (FP7), 18 candidats ont participé au concours.



École Nationale Supérieure des Mines
de Saint-Étienne

NNT : 2016LYSEM029

Amélie GRANGEAT

MODELLING VULNERABILITY, RESILIENCE AND CASCADING
EFFECTS OF PHYSICAL CRITICAL NETWORKS: INTERESTS FOR THE
PLANNING AND THE CRISIS MANAGEMENT OF UTILITY COMPANIES
AND CIVIL SAFETY

Speciality : Environment, Risk Management

Keywords : Vulnerability, resilience, cascading effects, risk management, safety institution

Abstract :

Crisis spread spatially and temporally inside the society through dependency links between physical critical networks: these phenomena are called cascading effects. After exploring cascading effects linked to the intervention of the fire brigade, this PhD thesis compares two modelling techniques: graph oriented database incorporating static impacts zones, and coupling of simulators in order to define evolutionary impacts zones – a method for applying this latest approach is proposed. It suggests also improving the automatic assessment of consequences per crisis scenario, in modelling the variation of population density on a territory. The vulnerability of each infrastructure contributes to cascading effects but the system resilience helps to stop them. This work proposes a global method for assessing vulnerability and resilience of physical critical networks (PCN). It has been applied first on detailed scenarios proposed by three different water utility companies. This work discusses then the extension of this approach to others PCNs. These results aim at helping the civil safety institutions to have a global view of PCNs vulnerability and resilience strategies proposed by utility companies. They aim also to help utility companies to have indicators for assessing and following their weak and strength facing threats, and to better identify axes of improvement.

École Nationale Supérieure des Mines
de Saint-Étienne

NNT : 2016LYSEM029

Amélie GRANGEAT

VULNERABILITE, RESILIENCE ET EFFETS CASCADE ENTRE
RESEAUX TECHNIQUES : APPORTS DE LA MODELISATION
SYSTEMIQUE ET SPATIALE POUR LA PLANIFICATION ET LA
GESTION DE CRISE AU PROFIT DES OPERATEURS RESEAU ET DE LA
SECURITE CIVILE

Spécialité: Génie de l'environnement, gestion des risques majeurs

Mots clefs : Vulnérabilité, résilience, crise, effet cascade, gestion des risques, sécurité civile

Résumé :

Les crises se développent en temps et en espace via les liens de dépendances entre les réseaux techniques vitaux au fonctionnement de la société : on parle alors d'effets cascade. Après avoir étudié les risques d'effets cascade liés aux actions des sapeurs-pompiers, ce travail compare deux modélisations techniques de ces effets cascades : les bases de données orientée graphe - contenant des zones d'influence statiques de chaque infrastructure réseau, et le couplage faible de deux simulateurs pour obtenir des zones d'influence évolutive – approche dont ce rapport propose une méthodologie d'application. Cette thèse s'intéresse également à l'amélioration de l'évaluation des conséquences d'un scénario de crise, en proposant une modélisation de l'évolution quotidienne des densités humaines sur un territoire. Un effet cascade entre réseaux techniques est facilité par la vulnérabilité de chaque infrastructure et ralenti par la résilience de chaque système. Cette thèse soumet donc une méthode d'évaluation de la vulnérabilité et la résilience des réseaux techniques, transposable aux différents réseaux et scénarios. Elle l'applique à des scénarios détaillés proposés par les opérateurs de trois réseaux d'eau potable, et discute de son extension à d'autres réseaux techniques. Ces résultats visent à proposer à la sécurité civile une vision globale des vulnérabilités et des stratégies de résilience mises en place par les opérateurs, et permet aux opérateurs de construire des outils de suivi de leurs capacités de résilience en cas de scénarios de crise.