HAL
open science

Espaces à enjeux et effets de réseaux dans les systèmes de risques

Jérôme Dutozia

To cite this version:

Jérôme Dutozia. Espaces à enjeux et effets de réseaux dans les systèmes de risques. Géographie. Université Nice Sophia Antipolis, 2013. Français. NNT : . tel-00785772v1

HAL Id: tel-00785772

https://theses.hal.science/tel-00785772v1

Submitted on 7 Feb 2013 (v1), last revised 12 Apr 2018 (v2)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE NICE-SOPHIA ANTIPOLIS

UFR « Espaces & cultures »
École Doctorale « Lettres, Sciences Humaines et Sociales »

Laboratoire ESPACE – UMR 7300

THÈSE
pour l'obtention du titre de
DOCTEUR DE l'UNIVERSITÉ DE NICE-SOPHIA ANTIPOLIS
Discipline : Géographie et Aménagement

ESPACES À ENJEUX ET EFFETS DE RÉSEAUX DANS LES SYSTÈMES DE RISQUES

Région Provence-Alpes-Côte d'Azur, Département du Var, Métropole de Marseille et Métropole de Barcelone

Présentée et soutenue publiquement par
Jérôme DUTOZIA

le 25 janvier 2013

Composition du jury :

M. Loïc GRASLAND, Professeur, Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse	Rapporteur
M. Mikhail KANEVSKI, Professeur, Université de Lausanne	Rapporteur
M. Olivier COUTARD, Directeur de Recherche CNRS, Université Paris-Est ENPC	Examinateur
M. Thierry SAINT-GERAND, Professeur, Université de Caen Basse Normandie	Examinateur
Mme. Christine VOIRON-CANICIO, Professeure, Université de Nice-Sophia Antipolis	Directrice

ESPACES A ENJEUX ET EFFETS DE RESEAUX DANS LES SYSTEMES DE RISQUES

Résumé :

Les territoires sont innervés par une multitude de réseaux sur lesquels se sont construits les modes de vie modernes et le fonctionnement de la société tout entière; cette dépendance de la société à leur égard se double d'une interdépendance entre les territoires eux-mêmes puisque de par leur structure, les réseaux d'énergie, de télécommunication, d'assainissement ou de circulation intègrent des territoires distincts dans un système commun. Ainsi peut-on poser l'hypothèse que le développement de réseaux va de pair avec le développement de la vulnérabilité des territoires. Cette interdépendance multi-niveau des territoires et des réseaux tend à complexifier les situations à risque et place l'anticipation de systèmes de risques et la détection des espaces à enjeux, dans un contexte de très forte incertitude. L'incomplétude, l'imprécision et l'incertitude autour de la connaissance rétrospective, spatiale et technique de ces systèmes de risques contraignent d'autant plus cette démarche. Malgré cela, pour parvenir à un niveau de prédictibilité et d'anticipation satisfaisant, la modélisation spatiale des systèmes de risque doit alors être capable d'intégrer différents types d'effets dominos et d'envisager les nombreuses trajectoires possibles de la diffusion spatiale des impacts d'un aléa. Dans ce cadre possibiliste, la modélisation spatiale des systèmes de risques et la détection des espaces à enjeux s'appuient sur l'articulation originale de quatre concepts liés à l'analyse des risques et la stabilité des systèmes : la susceptibilité, la criticité, la résilience et la dépendance, que nous avons regroupées sous l'acronyme SCReD. L'estimation de ces propriétés territoriales est réalisée à partir de traitements géomatiques permettant de prendre en compte l'incertitude et l'imprécision, et aboutit à une délimitation des espaces à risques, influencée notamment par les concepts d'espaces géographiques flous. La démarche, orientée à la fois vers le théorique et l'opérationnel, repose sur la compréhension des liens entre vulnérabilité des territoires, vulnérabilité des réseaux et vulnérabilité des populations. Ces méthodes sont appliquées de manière rétrospective aux cas de Barcelone et du département du Var, et dans une logique anticipative et de détection des espaces à enjeux dans le cas de Marseille. Les systèmes de risques associés à ces applications peuvent être d'une complexité variable et déclenchés par différents types d'aléas ; dans le cas de Barcelone, l'évènement est initialement une coupure électrique, dans le cas du Var, on considère également les interactions du système territoire-réseau avec les aléas naturels incendies et tempêtes de neige, alors que pour le cas Marseillais, les systèmes de risques sont initiés par une inondation. Progressivement, au fil des exemples proposés, la complexité des méthodes de spatialisation des systèmes de risques s'accroit en prenant en compte l'incertitude et l'imprécision de manière de plus en plus explicite. Les résultats apparaissent alors plus nuancés, les limites spatiales des systèmes de risques s'estompent et perdent en termes de netteté ce qu'elles gagnent en termes d'exactitude.

STRATEGIC AREAS AND NETWORK EFFETS IN RISK SYSTEMS

Summary :

Territories are innervated by a multitude of networks on which modern lifestyles have been built up as well as the functioning of society as a whole; such dependence of society towards them is coupled with an interdependence between those territories, in view of the fact that because of their structure, energy, telecommunications, water, drainage and circulation networks integrate different territories into a common system. Therefore, the following hypothesis can be put forward: developing networks goes hand in hand with developing the vulnerability of territories. Such multi-level interdependence tends to make risk situations more complex, and anticipating risk systems and detecting strategic areas is carried out in a context of high uncertainty. The fact that the retrospective, spatial and technical knowledge of thess risk systems is incomplete, imprecise and uncertain is all the more constraining for that approach. In spite of the foregoing, in order to attain a satisfactory level of predictability and anticipation, spatial modelling of risk systems should therefore be able to integrate various types of domino effect and envisage the numerous possible paths followed by the spatial diffusion of unknown factors. In such a possibilist context, spatial modelling of risk systems and the detection of strategic areas is based on the original articulation of four concepts related to risk analysis and system stability: susceptibility, criticality, resilience and dependence, which we designate by the acronym SCReD. Assessing territorial properties is carried out through geomatics processing taking into account uncertainty and imprecision, and leads to the delimitation of risk areas, influenced among others by the concept of vague geographical areas. The approach, which is oriented both towards the theoretical and the operational, is based on the understanding of the links between the vulnerability of territories, vulnerability of networks and vulnerability of populations. These methods are applied retrospectively to the cases of Barcelona and the Var département, and in the case of Marseille with an anticipative approach in order to detect strategic areas. The risk systems associated to these applications may be diversely complex and be triggered by different kinds of unknown factors; in the case of Barcelona, it is a power cut; in the case of the Var are also taken into account interactions between the network-territory system and natural occurrences such as fires and snow storms. In the case of Marseille, the risk systems are triggered by floods. In the examples proposed, the spatialization methods of risk systems become progressively more complex, taking into account uncertainty and imprecision in an increasingly explicit manner. Then results appear, more qualified, the spatial limits of risk systems become less marked and lose in terms of clarity what they gain in terms of accuracy.

ESPACIOS DE IMPORTANCIA Y EFECTOS DE LAS REDES DENTRO DE LOS SISTEMAS DE PREVENCIÓN DE RIESGOS

Resumen:

Los territorios están conectados por una multitud de redes sobre las que son construidas las formas de vida modernas y el funcionamiento de la sociedad al completo. Esta dependencia de la sociedad respecto a las redes se añade a una interdependencia entre los propios territorios ya que debido a su estructura, dichas redes de energía, de telecomunicación, de saneamiento o de circulación integran territorios distintos dentro de un sistema común. Así, podemos establecer la hipótesis de que el desarrollo de redes va a la par con el desarrollo de la vulnerabilidad de los territorios. Esta interdependencia multinivel de los territorios y de las redes tiende a complejizar las situaciones de riesgo y sitúa los sistemas de prevención de tales riesgos y a la detención de espacios de importancia, en un contexto de fuerte incertidumbre. La falta, la imprecisión y la incertidumbre en torno al conocimiento retrospectivo, espacial y técnico de estos sistemas de riesgos limita todavía más esta gestión. A pesar de esto, para conseguir un nivel de predictibilidad y de anticipación satisfactorio, la modelización espacial de los sistemas de prevención de riesgos debe ser capaz de integrar diferentes tipos de efecto dominó y prever las numerosas trayectorias posibles de la difusión espacial. En este marco posibilista, la modelización espacial de sistemas de riesgo y la localización de de espacios de importancia se apoyan sobre la articulación original de cuatro conceptos ligados al análisis de riesgos y a la estabilidad de los sistemas: La susceptibilidad, la crítiticidad, la adaptación, y la dependencia, que hemos reagrupado en el acrónimo SCReD. La estimación de estas propiedades territoriales está realizada a partir de tratamientos geomáticos que permiten tener en cuenta la incertidumbre y la imprecisión, y llegar a un resultado de delimitación de espacios de riesgo, influenciados especialmente por los conceptos de espacio geográficos difusos. La gestión, orientada a la vez teórica y operacionalmente, descansa sobre la comprensión de los vínculos entre la vulnerabilidad de los territorios, la vulnerabilidad de las redes y la vulnerabilidad de las poblaciones. Estos métodos son aplicados de manera retrospectiva a los casos de Barcelona y del departamento de Var; y dentro de una lógica anticipativa y de localización de espacios de importancia en el caso de Marsella. Los sistemas de prevención de riesgos asociados a estas aplicaciones pueden ser de una complejidad variable y pueden así mismo provocar diferentes tipos de elementos imprevisibles. En el caso de Barcelona, el acontecimiento es inicialmente un corte eléctrico; en el caso de Var, consideramos igualmente las interacciones del sistema territorio-red con los elementos naturales imprevisibles como los incendios y las tormentas de nieves; mientras que para el caso marsellés, los sistemas de prevención de riesgos son iniciados por una inundación. Progresivamente, al hilo de los ejemplos propuestos, la complejidad de los modelos de espacialización de los sistemas de prevención de riesgos se incrementan teniendo en cuenta la incertidumbre y la imprecisión de una manera cada vez más explícita. Los resultados parecen ser más sutiles y los límites espaciales de los sistemas de prevención de riegos se difuminan, perdiendo en términos de nitidez, aunque ganando en términos de exactitud.

GLOSSAIRE

ACR. - Agence de Conduite Régionale, dépendant d'ERDF et surveillant en permanence l'ensemble des réseaux électriques.

Apagón. - Panne électrique, en espagnol.

BT.- Basse tension, la valeur de tension est comprise entre 225V et 1kV

CODIS. - Centre Opérationnel Départemental d'Incendie et de Secours

Cygne noir. - Évènement aléatoire, hautement improbable, ayant un impact énorme, presque impossible à prévoir, dont on tente de trouver une explication rationnelle *a posteriori*. Voir l'ouvrage du même nom de N. N. Taleb.

DICRIM. - Document d'Information Communal sur les Risques Majeurs.

DV. - Diagramme de Voronoï standard.

DVPM (ou VPM). - Diagramme de Voronoï pondéré de manière multiplicative.

ENS. - Energy not supplied, énergie non fournie (indicateur)

ERDF. - Electricité Réseau Distribution France

ESCOTA. - Nom du réseau des autoroutes Estérel, Côte d'Azur, Provence et Alpes

HTA. - Haute tension A, la valeur de tension est comprise entre 1 kV et 50 kV

HTB. - Haute tension B, la valeur de tension est supérieure à 50 kV en alternatif

ICV. - Indice de couverture correspondant à la part de surface d'une maille contenant un périmètre affecté par une coupure électrique.

NERC. - North American Electric Reliability Corporation

OMT. - Organe manœuvré par télécommande, utilisé dans le fonctionnement du réseau électrique

Petit monde. - Propriété d'un réseau dont la densité est faible et qui pourtant dispose d'une structure robuste. Small world, en anglais.

PGA. - Peak Ground Acceleration, amplitude maximale de l'accélération du sol, mesurée pour les ondes sismiques.

Poste client. - Poste destiné à alimenter en courant 20kV directement les clients de type industriel.

Poste source. - Poste de transformation HTB en HTA

Quantificateur flou. - Formalisation mathématique consistant à établir des systèmes de déductions fondés sur des appréciations linguistiques correspondant à des intervalles de valeurs.

RDT. - Risque Décision Territoire, programme de recherche lancé en 2003 par le Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du territoire.

RT. - Restoration time, durée de la coupure, indicateur.

RTE. - Réseau de Transport d'Electricité

RYF. - Robust Yet Fragil, propriété des réseaux complexes

RS. - Random Spread, modèle de diffusion.

SCADA. - Supervisory Control and Data Acquisition, système utilisé dans la gestion des réseaux d'eaux, des flux électriques ou des centrales nucléaires.

Scale-free. - Nom donné au réseau dont le degré de distribution suit une loi de puissance, au moins asymptotiquement. Les nouveaux liens tendent à s'établir davantage avec des nœuds qui disposent déjà d'une forte connexité.

SCReD. - Susceptibilité, Criticité, Résilience et Dépendance, démarche de spatialisation des systèmes de risques, basée sur l'articulation de ces 4 concepts qui permet de rendre compte de la complexité spatiale dans les systèmes de risques, et plus précisément, de son rôle d'agent dans leurs dynamiques de diffusion.

SDIS. - Service Départemental d'Incendie et de Secours.

TLP. - Total loss of power, quantité d'énergie perdue, indicateur.

UCTE. - Union pour la Coordination du Transport de l'Electricité, association des gestionnaires de réseaux électriques de transport interconnectés de l'Europe continentale.

VH. - Diagramme de Voronoï hiérarchique

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE 10

PARTIE 1 : CONCEPTS ET MÉTHODES POUR UNE ANALYSE GÉOGRAPHIQUE ET SPATIALE DES SYSTÈMES DE RISQUES LIÉS AUX RÉSEAUX 13

CHAPITRE 1 : AUTOUR DES RÉSEAUX 15

CHAPITRE 2 : UNE APPROCHE SPATIALE DES SYSTÈMES DE RISQUES ET DE LEURS DIFFUSIONS 58

CHAPITRE 3 : SCRED, DEMARCHE DE DÉTECTION DES ESPACES À ENJEUX, SPATIALISATION APPROXIMATIVE ET POSSIBILISTE DES SYSTÈMES DE RISQUES 88

CONCLUSION PARTIE 1 136

PARTIE 2 : APPLICATIONS RÉTROSPECTIVES ET ANTICIPATIVES DES SYSTÈMES DE RISQUES DE COUPURES ÉLECTRIQUES 138

CHAPITRE 4 : ANALYSES RÉTROSPECTIVES ET APPLICATIONS À LA REGION PACA ET AU DÉPARTEMENT DU VAR 139

CHAPITRE 5 : SCRED, APPLICATION DANS UNE LOGIQUE POSSIBILISTE ET ANTICIPATIVE DANS LA MÉTROPOLE DE MARSEILLE : 170

CHAPITRE 6 : SPATIALITÉ ET TEMPORALITÉ DES RISQUES EN RÉSEAUX DANS LES SYSTÈMES URBAINS - ANALYSE RÉTROSPECTIVE DE LA COUPURE ÉLECTRIQUE DANS LA MÉTROPOLE DE BARCELONE, 23 - 25 JUILLET 2007 220

CONCLUSION GENERALE 270

INTRODUCTION GENERALE

Parallèlement au développement des territoires, la croissance des réseaux techniques, de leurs interdépendances, de la dépendance sociétale aux services fournis par ces réseaux ainsi que les transformations des rapports d'interdépendances spatiales induits par leurs structures, contribuent à l'émergence d'évènements échappant aux formalisations et aux méthodes d'estimations habituelles du risque et de la vulnérabilité des territoires.

Le potentiel de déstabilisation des systèmes territoriaux et des sociétés initié par les dysfonctionnements des réseaux techniques constitue d'ailleurs une composante inédite de cette vulnérabilité territoriale tant du point de vue de l'échelle spatiale que de la gravité, l'imprévisibilité et la complexité des chaines d'impacts potentiels qu'elles engendrent (Theys, 1987, Kerjan, 2000, 2003). Les systèmes de risques initiés ou associés à l'endommagement des réseaux techniques constituent de ce fait un enjeu de connaissance important dont la compréhension et l'anticipation participent à un développement durable des territoires, des réseaux et des sociétés.

Dans ce cadre, la vulnérabilité des territoires apparaît possiblement ubiquiste puisqu'un sous-espace n'est plus seulement exposé aux perturbations qui vont affecter son emprise spatiale mais à l'ensemble des perturbations susceptibles d'affecter les composantes spatiales avec lesquelles il entretient un rapport d'interdépendance ; et possiblement chaotique, dans la mesure où même un incident mineur et localisé peut se transformer, par effets dominos et diffusion réticulaire, en catastrophe majeure et généralisée.

Ainsi, en considérant le plus souvent les territoires comme de simples supports de réalisation, composantes passives des systèmes de risques, les approches classiquement employées dans l'analyse des risques apparaissent assez inadaptées pour appréhender et gérer ce type d'évènements complexes. De plus, l'état des recherches souligne une certaine déconnexion entre d'un côté, les analyses de la vulnérabilité des territoires et de l'autre, la vulnérabilité des réseaux et des systèmes complexes. Nous prenons alors le parti de faire des interdépendances territoires-réseaux notre ancrage dans l'analyse des systèmes de risques.

Ce parti pris d'ancrer les systèmes de risques dans les interdépendances des réseaux et des territoires intervient à deux niveaux. Dans le cadre du modèle d'estimation de possibilités d'impacts, de détection des espaces à enjeux et d'anticipation des trajectoires des systèmes de risques, on s'intéresse à la manière dont ce système se réalise et se concrétise : le moment où les différentes vulnérabilités et les systèmes de causalités latents se combinent pour produire un « évènement » ou tout au moins une anormalité.

Cette étape de concrétisation du système de risques nécessite au préalable une réflexion sur la construction de ce système, ses « causes profondes » (Blaikie et al., 1994), qui le plus souvent n'opèrent pas dans la temporalité événementielle, mais dans une temporalité plus longue liée au développement des territoires, des réseaux et des sociétés. En effet, si en apparence

quelques secondes peuvent suffire à leur déclenchement et leur diffusion, certains évènements n'ont en réalité pu survenir qu'au terme d'un processus de « maturation » du système de risques, une sorte systémogénèse, au cours de laquelle se développent les forces de déstabilisation du système territoire-réseau. Ainsi peut-on poser l'hypothèse que le développement de réseaux va de pair avec le développement de la vulnérabilité des territoires.
La présentation de la recherche est structurée en deux grandes parties, la première s'attache à décrire et formaliser les enjeux d'une démarche de détection des espaces à enjeux et d'effets de réseaux dans les systèmes de risques. La seconde met en application cette formalisation et les méthodologies d'analyse proposées dans l'analyse des systèmes de risques de différents territoires, pour différents aléas, à différentes échelles de temps et d'espaces.

Le premier chapitre est un état des recherches autour des réseaux. Il souligne que la vulnérabilité des réseaux techniques et l'analyse des infrastructures critiques font l'objet de nombreuses recherches techniques et opérationnelles ; en plus de ces recherches appliquées, des recherches plus théoriques, fondées sur les principes de structure et de stabilité des systèmes complexes ont permis d'obtenir des résultats intéressants, notamment sur l'hypersensibilité de certaines structures complexes à des attaques ciblées alors qu'elles sont résistantes face aux attaques aléatoires (Barabasi, Albert, 1999, Doyle, 2005), la surreprésentation des pannes à petite échelle dans les réseaux électriques ou encore les propriétés d'auto-organisation critique de ce même réseau (Carreras, 2001). Néanmoins, ces approches appréhendent en général, les réseaux de manière déconnectée des territoires, le système de risques n'est alors considéré que dans sa dimension réticulaire et technique.

Dans le second chapitre, nous présentons l'optique générale de la démarche et l'originalité de son positionnement par rapport aux recherches existantes sur la thématique des risques et de la vulnérabilité des réseaux. L'intérêt et la pertinence du choix de considérer les coupures électriques comme un cas d'école pour l'analyse des systèmes de risques sera également décrit dans chapitre. Les fondements théoriques et méthodologiques d'une approche spatiale des systèmes de risques liés aux réseaux sont présentés et organisés autour des deux piliers « Espace, réseau et système » et « Espace, risque et système ». Ces fondements nous permettront de consolider notre formalisation des systèmes de risques et des espaces à enjeux puis de développer plus en détail, la problématique et la démarche de cette recherche doctorale. Cette interdépendance multi-niveau des territoires et des réseaux tend à complexifier les situations à risque et place l'anticipation de systèmes de risques et la détection des espaces à enjeux, dans un contexte de très forte incertitude. L'incomplétude, l'imprécision et l'incertitude autour de la connaissance rétrospective, spatiale et technique de ces systèmes de risques contraignent d'autant plus cette démarche.

Malgré cela, pour parvenir à un niveau de prédictibilité et d'anticipation satisfaisant, la modélisation spatiale des systèmes de risques doit alors être capable d'intégrer différents types d'effets dominos et d'envisager les nombreuses trajectoires possibles de la diffusion spatiale des impacts d'un aléa. Dans ce cadre possibiliste, la modélisation spatiale des systèmes de risques et la détection des espaces à enjeux s'appuient sur l'articulation originale de quatre concepts liés à l'analyse des risques et la stabilité des systèmes : la susceptibilité, la criticité, la résilience et la dépendance, que nous avons regroupées sous l'acronyme SCReD et

que nous présenterons dans le chapitre 3. L'estimation de ces propriétés territoriales est réalisée à partir de traitements géomatiques permettant de prendre en compte l'incertitude et l'imprécision, et aboutit à une délimitation des espaces à risques, influencée notamment par la logique possibiliste (Zadeh, 1978), les concepts d'espaces géographiques flous et de franges spatiales (Rolland May, 1987), et d'espaces à enjeux statiques et dynamiques (Voiron, Olivier, 2007).

Dans la partie 2, ces méthodes sont appliquées de manière rétrospective aux cas de Barcelone et du département du Var, et dans une logique anticipative et de détection des espaces à enjeux dans le cas de Marseille. Les systèmes de risques associés à ces applications peuvent être d'une complexité variable et déclenchés par différents types d'aléas ; dans le cas de Barcelone, l'évènement est initialement une coupure électrique, dans le cas du Var, on considère également les interactions du système territoire-réseau avec les aléas naturels incendies et tempêtes de neige, alors que pour le cas Marseillais, les systèmes de risques sont initiés par une inondation.

Progressivement, au fil des exemples proposés, la complexité des méthodes de spatialisation des systèmes de risques s'accroît, en prenant en compte l'incertitude et l'imprécision de manière de plus en plus explicite. Les résultats apparaissent alors, plus nuancés, les limites spatiales des systèmes de risques s'estompent et perdent en termes de netteté ce qu'elles gagnent en termes d'exactitude.

PARTIE 1 : CONCEPTS ET MÉTHODES POUR UNE ANALYSE GÉOGRAPHIQUE ET SPATIALE DES SYSTÈMES DE RISQUES LIÉS AUX RÉSEAUX

CHAPITRE 1 : AUTOUR DES RÉSEAUX

Introduction

Le premier chapitre est un état des recherches théoriques et opérationnelles autour des réseaux, et des interactions de leurs structures et leurs dysfonctionnements. La diversité des recherches dont il est fait mention dans ce premier chapitre témoigne de notre volonté de considérer, dans un premier temps, la problématique des réseaux de manière très générale et pluridisciplinaire, avant de préciser dans le chapitre second, ce qui constitue les fondements d'une approche géographique de cette problématique.

Nous resituons de manière assez générale l'évolution de la composante technique et de sa place dans la relation entre l'Environnement et la Société. Ainsi, du fait de la dépendance du système territorial au système technique, il apparaît que certains évènements observés témoignent d'une forme originale et partiellement inédite de fragilité des territoires développés. Une réflexion sur l'imbrication des systèmes de causalités dans l'explication et l'anticipation des « évènements », au sens large, est également engagée ; elle a pour objectif de déterminer si au-delà de la diversité des causes apparentes et des modes de déclenchements des systèmes de risques, il n'existerait pas des causes plus profondes permettant de comprendre et anticiper ces systèmes de risques.

Ces réflexions d'ordre assez général, sont suivies d'un état des recherches plus ciblé sur les réseaux électriques et sur la formalisation théorique des réseaux. Nous tentons de mettre en parallèle certaines propriétés structurelles des réseaux avec la dynamique temporelle et spatiale de leurs dysfonctionnements. Le caractère à la fois robuste et fragile des réseaux complexes (Doyle, 2005) est mis en avant, et la sensibilité des réseaux hétérogènes à des attaques ciblées sur certains nœuds stratégiques témoigne de l'intérêt d'une logique de détection d'espaces à enjeux dans l'anticipation des systèmes de risques.

Enfin, dans une logique plus opérationnelle, des recherches appliquées sur le concept d'infrastructures critiques interdépendantes et sur la vulnérabilité des réseaux techniques face aux aléas naturels sont également présentées.

1.1 PROPRIETÉS GÉNÉRALES DES ÉVÈNEMENTS À RISQUES IMPLIQUANT DES EFFETS DE RÉSEAUX

1.1.1. Développement, modernité et risques

1.1.1.1. Des évènements qui mettent en lumière une forme originale de fragilité des territoires développés.

Suite à la grande panne électrique d'août 2003, durant laquelle près de 50 millions d'habitants de la Côte Est furent privés d'électricité, le New York Times publiait un article interprétant cet évènement comme le signe, voire la preuve, qu'une des plus grandes puissances mondiales était dotée d'un réseau électrique au niveau de performance équivalent à ceux des pays en voie de développement ou des pays moins avancés. Cette remarque faisait écho aux nombreuses critiques émises par les populations mais aussi par les autorités publiques sur le manque d'investissement dans la construction et l'entretien des infrastructures électriques.

En réponse, Benjamin Carreras, physicien et spécialiste des risques de coupures électriques, expliquait au contraire, qu'au-delà des problèmes d'investissements dans le réseau, cette grande panne électrique était justement typique des territoires les plus développés et même qu'elle n'aurait pas pu se réaliser dans un pays du Tiers Monde ; ce type de crise serait selon lui caractéristique des territoires du « First World » et non du « Third World » (pour reprendre les expressions utilisées dans le texte). Deux raisons majeures peuvent expliquer cette spécificité.

D'abord, au niveau de l'échelle de la coupure, les pays les moins avancés économiquement, s'ils sont équipés en électricité, se caractérisent par des pannes électriques assez régulières et localisées à grande échelle; à l'inverse, les territoires les plus développés bénéficient d'un réseau électrique fortement interconnecté constituant un système d'interdépendance entre des lieux très distants. Cette interdépendance électrique à petite échelle (sur de grands espaces) peut être considérée comme un indice du niveau de développement et de performance du système technique ; elle permet notamment de diminuer les pannes régulières et localisées grâce à des mécanismes de solidarités plus importants. Parallèlement, ce système d'interdépendance à petite échelle rend également possible l'apparition des défaillances en cascades, de report de charge et d'écroulement global du système : « grands réseaux, grandes pannes » (Michel - Kerjan, 2000, 2003). Ainsi, dans le but d'éliminer les petites pannes localisées, le système développerait une forme de fragilité nouvelle, liée à sa capacité à propager des défaillances à petite échelle jusqu'à provoquer l'écroulement de l'intégralité du système.

Ensuite, au niveau des conséquences de la panne, la dépendance électrique moins importante, ainsi qu'une certaine « habitude » des coupures électriques laissent penser que les sociétés des pays du Tiers Monde pourraient avoir une meilleure capacité d'absorption de ce type de perturbation que celle des pays développés où la panne électrique s'avèrerait davantage paralysante et pénalisante pour maintenir l'équilibre du fonctionnement sociétal. On retrouve dans cet exemple, un principe connu dans l'analyse de la résilience des systèmes : « un système caractérisé par une forte variabilité [temporelle] a plus de chances qu'un système de forte stabilité de supporter une perturbation sans s'effondrer car il est plus flexible et plus apte à l'incorporer dans son fonctionnement » (Aschan -Leygonie, 2000).

Dans cette perspective, les systèmes de risques à petite échelle et la faible résilience du système sociétal face aux perturbations des réseaux techniques deviennent la contrepartie d'un haut niveau de performance et de sécurité des réseaux. Le développement des réseaux électriques à petite échelle possèderait donc un effet dialogique sur la continuité

d'approvisionnement électrique et la stabilité des systèmes territoriaux, d'un côté, la baisse de la fréquence des petites pannes conduit à une amélioration des indicateurs globaux de sécurité, de l'autre, la fréquence, la récurrence et la gravité des pannes à petite échelle tendraient inversement à augmenter.

1.1.1.2. New York, capitale mondiale… des pannes électriques ?

De manière plus anecdotique, au sujet du lien entre modernité, développement des territoires et des systèmes de risque, on peut noter que dans l'inconscient collectif, les premières grandes pannes électriques marquantes sont souvent associées à la ville de New York (évènements du 9 novembre 1965 ou du 13 juillet 1977). Le fait que les premières réalisations marquantes de systèmes de risques liés aux défaillances des réseaux techniques se situent dans une ville qui correspond justement à une des toutes premières métropoles mondiales et ville emblématique de la modernité depuis le début du siècle, ne nous paraît pas forcement anodin. En effet, cela pourrait accréditer l'hypothèse selon laquelle les interruptions d'alimentation électrique peuvent constituer des risques graves à partir d'un certain niveau de développement du système urbain et du système technique qui lui est associé. Si dans l'histoire moderne, les premières grandes pannes électriques « mémorables » sont fréquemment associées à la ville de New York, ce pourrait donc être parce que dans ce territoire, avant les autres, le niveau de développement et la dépendance électrique du fonctionnement territorial qu'il induit, atteignait un niveau suffisant pour transformer une panne électrique en une ville en panne.

D'autre part, la comparaison entre la réaction des populations new-yorkaises au cours des coupures électriques de 1965, 1977 et 2003 montre à quel point il est délicat d'anticiper les comportements des populations face à ces évènements. En effet, en 1965, les coupures électriques impactaient une grande partie du Nord Est américain mais ne provoquaient pas de mouvements sociaux ou de troubles particuliers dans la métropole new yorkaise dont on saluait l'esprit civique des habitants. En revanche, de la coupure électrique de 1977 qui, cette fois, concerne exclusivement New York et ses alentours, on retient les importantes émeutes et les vagues de violences qui ont conduit à plus de quatre mille arrestations. Ceci aurait pu nous amener à penser à une baisse de l'acceptabilité des pannes électriques dans le temps si lors de la coupure électrique de 2003, on n'avait pas observé un calme assez comparable à celui de 1965. Les réactions des populations face aux coupures électriques de plusieurs heures sont donc assez variables et plusieurs cas de figures sont envisageables, de l'absence quasi-totale de désordres sociaux dans de nombreux évènements, en passant par les manifestations comme ce fut le cas à Barcelone en 2007, ou même les émeutes comme à New York en 1977, ou plus récemment à Dakar en 2010 et Karachi en 2011.

L'anthropologue Alain Bertho, dans son site de recensement des phénomènes d'émeutes dans le monde, mis en place depuis 2007, propose d'ailleurs une catégorie « émeutes de l'électricité » pour qualifier les troubles sociaux importants et de plus en plus fréquents, déclenchés par les coupures électriques dans le monde. Néanmoins, dans la majorité des cas récents, ces émeutes de l'électricité interviennent dans des endroits où le niveau de sécurité d'approvisionnement électrique est extrêmement faible et où une partie des populations se révolte non pas pour une simple coupure électrique mais plus largement contre « la déficience

des services les plus élémentaires » (Bertho, 2007), le faible niveau de vie ou encore des régimes politiques autoritaires.

1.1.1.3. Développement des territoires et évolution de la composante technique dans la relation Environnement - Société

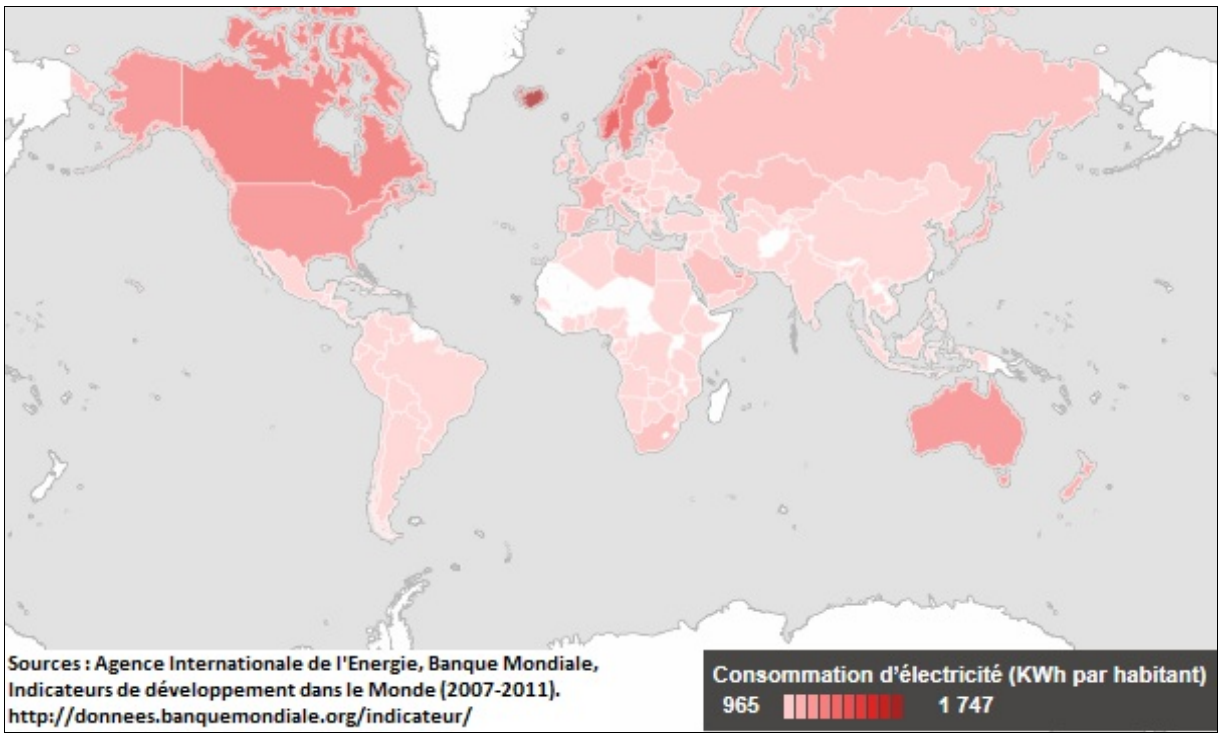
Dans la Société du Risque, Ulrich Beck parle de « nature sociétisée » pour qualifier l'imbrication totale du système « nature » dans la sphère du système sociétal ; cet élément est identifié comme une originalité forte des sociétés modernes : « tandis que la notion de société industrielle classique repose sur l'opposition de la nature et de la société, la notion de société du risque prend pour point de départ une nature intégrée à la civilisation.» (Beck, 1986). Le système technique, constitué entre autre par les infrastructures en réseaux, est un rouage essentiel de ce processus d'intégration de la nature dans la société et on peut considérer dans une certaine mesure, que le développement et le progrès ont induit une dépendance inédite de l'équilibre du système sociétal vis à vis du fonctionnement du système technique. Dans la philosophie moderne, on retrouve d'ailleurs chez plusieurs auteurs des réflexions sur la place inédite de la Technique dans la relation Homme – Nature, Habermas a insisté par exemple sur les risques d'instrumentalisation et plus largement les déséquilibres dans la relation Homme – Nature que pouvaient introduire la Technique, en termes de domination et d'exploitation de la Nature, mais aussi de dépendance accrue à la Technique pour maintenir un équilibre dans la relation des Sociétés avec la Nature.

Ces remarques pourraient paraître un peu éloignées de notre sujet de départ et de la Géographie. Nous pensons pourtant qu'elles sont importantes pour concevoir le territoire, qui est une forme matérielle de l'interaction Espace et Société, et donc dans lequel la composante Technique occupe une place qui est liée à celle qu'elle occupe dans le cadre de la relation Homme - Nature. Les systèmes de risques initiés ou associés à l'endommagement des réseaux techniques constituent de ce fait, un enjeu de connaissance important dont la compréhension, l'anticipation et la gestion participent à un développement durable des territoires, des réseaux et des sociétés.

Toujours au niveau du lien entre développement et systèmes de risques, la carte mondiale de la consommation moyenne d'électricité par habitant (carte 1) permet également de comprendre pourquoi les systèmes de risques associés aux défaillances des réseaux techniques ne peuvent s'envisager de la même manière à l'échelle du globe. Le degré frappant d'inégal accès à l'électricité dans le monde est par ailleurs un exemple pertinent pour illustrer la distinction entre les risques des sociétés de pénurie (Beck, 1986) et ceux des sociétés de dépendance.

Dans les sociétés de pénurie électrique, l'absence en continu d'électricité a des conséquences humaines, sociales et économiques fortes et contribue à une diminution importante de l'espérance de vie et de la qualité de vie. Elle limite la conservation de vaccins, l'équipement en pompes à eau, certains soins médicaux et plus largement, freine l'accès de ces territoires à la modernité. Ainsi, à l'échelle des zones rurales de l'Afrique subsaharienne ou de l'Asie du Sud Est par exemple, envisager les systèmes de risques liés à la perturbation évènementielle des réseaux et la dépendance électrique des systèmes territoriaux, n'aurait pas grand sens.

Par contre, dans les sociétés de dépendance, si l'énergie électrique et les autres services fournis par les réseaux techniques ont contribué à l'amélioration de la qualité et de l'espérance de vie, ce sont en retour, les discontinuités évènementielles de l'approvisionnement et du fonctionnement des réseaux qui sont susceptibles d'impacter fortement la stabilité et la sûreté du fonctionnement territorial sur des échelles d'Espace et de Temps importantes.



Carte 1 : Consommation d'électricité en KWh par habitant dans le Monde, avec valeurs de références comprises entre 2007 et 2011 selon les pays. (Source : Agence internationale de l'énergie, 2012)

1.1.2. Complexité et imprévisibilité des évènements à risques liés aux dysfonctionnements des réseaux

1.1.2.1. La disproportion entre les causes apparentes et leurs effets

Les risques et la vulnérabilité des systèmes territoriaux sont des problématiques généralement abordées en considérant qu'un territoire durable et robuste doit pouvoir absorber des chocs exogènes importants ; on cherche par exemple à minimiser les effets catastrophiques de «grandes causes» comme un séisme ou une inondation sur le fonctionnement des systèmes territoriaux. Dans notre cas, la perspective est un peu différente dans la mesure où nous considérons des évènements à risques dont le déclenchement peut également être d'origine endogène et lié à une perturbation de très faible intensité, localisée de manière ponctuelle dans l'espace, et pourtant capable d'engendrer des effets sociétaux importants sur des surfaces très importantes.

Dans cet esprit, Jacques Theys expliquait déjà en 1987 que « ce sont les évènements beaucoup plus que les analyses théoriques, qui ont imposé l'idée de la société vulnérable (…). Les

catastrophes réelles ou imaginaires ont probablement contribué à l'émergence du thème dans l'opinion publique. Mais c'est plutôt le choc de villes entières ou de grandes entreprises paralysées ou déstabilisées par des incidents ou des pannes en apparences mineures qui l'ont enraciné dans l'inconscient collectif ». (Theys, 1987). Un élément nous paraît particulièrement important et bien mis en avant dans la formulation de la citation : le contraste et le caractère disproportionné entre des effets qui sont décrits en des termes forts : «chocs », « villes entières paralysées », par opposition aux causes initiales de déclenchement de l'évènement dont la description évoque le caractère anodin : « incidents, pannes », «apparences mineures ».

Ainsi peut-on penser que la recherche d'une organisation des territoires et des réseaux « optimisés » et aptes à supporter des chocs importants (le plus souvent par le biais d'améliorations du système technique), puisse conduire à sous-estimer le développement d'une autre forme de fragilité, qui consiste en une structure paradoxalement capable d'absorber certaines perturbations fortes tout en pouvant parfois être fortement déstabilisée par certaines perturbations faibles. L'analyse et l'anticipation de ces risques deviennent alors particulièrement mal aisées puisqu'elles nous conduisent à considérer non plus un mécanisme classique de cause à effets, où l'importance des impacts territoriaux est simplement relative à l'intensité de la perturbation, mais un système de risques où la gravité des impacts est relative aux systèmes territoriaux et réticulaires, susceptibles à la fois de produire, aggraver, diffuser et subir ces impacts.

1.1.2.2. L'importance des effets dominos.

Cette disproportion des causes apparentes et des effets peut s'observer dans de nombreux évènements récents : la coupure électrique à petite échelle du réseau européen de novembre 2006, qui avait touché 10 millions d'européens et aurait pu se transformer en écroulement total du réseau, avait été initiée par le simple passage d'un paquebot sous une ligne électrique allemande. Ou encore en avril 2010, l'irruption du volcan Eyjafjöll dans l'Est de l'Islande avait provoqué le blocage partiel du réseau aérien européen conduisant à l'annulation de plus de 100 000 vols, pour un coût estimé variant entre un et cinq milliards d'euros pour les seules compagnies aériennes ; les exemples ne manquent pas. On peut noter également que malgré leur apparente similitude, il existe une différence importante entre les deux évènements cités ; dans le cas de l'évènement de Novembre 2006, la diffusion spatiale est strictement liée au réseau électrique et à un dommage initial ponctuel, elle interroge avant tout la dimension systémique de la fragilité ; dans le cas d'Avril 2010, la diffusion des impacts est avant tout liée à la diffusion du nuage de fumée liée à l'éruption.

Considérant par exemple, les dix pannes électriques les plus importantes en termes de pics de clients coupés, on s'aperçoit que la grande majorité de ces pannes sont postérieures à l'an 2000 et surtout sont déclenchées par un incident ou une combinaison d'incidents mineurs plutôt que par des évènements naturels extrêmes conduisant à la destruction de nombreux postes. La complexité et la gravité des chaînes de défaillances semblent en quelque sorte s'autonomiser vis-à-vis de leurs causes de déclenchements.

Par ailleurs, l'importance des effets dominos dans le déroulement de ces évènements témoigne du caractère dynamique de la composante-réseau dans les systèmes de risques : la

composante réagit de manière active et potentialise la réalisation de nouveaux impacts, elle est à la fois système cible et système source du danger pour reprendre la distinction établie dans le modèle d'analyse de dysfonctionnements des systèmes MADS (Périlhon, 1999)

Sans même parler de crises à petite échelle, on retrouve également ce type de distorsions entre causes et effets à une échelle plus régionale. Par exemple, on peut mettre en parallèle la disproportion des impacts électriques entre une inondation importante dans une zone urbaine concentrant des enjeux comme Marseille où l'ennoiement de plusieurs postes électriques avait provoqué la coupure électrique de « seulement » 40 000 foyers en septembre 2003, alors qu'à quelques kilomètres, dans une zone faiblement peuplée, la simple chute d'un arbre sur une ligne électrique au milieu d'une forêt du Var avait provoqué la coupure électrique d'un million de foyers le 5 Mai 2005 en région PACA (dont une partie des habitants de Marseille).

Le propos de cet exemple n'est pas de présenter les réseaux comme invulnérables aux fortes perturbations, ni même plus vulnérables aux petites perturbations qu'aux grandes. L'analyse rétrospective de plusieurs évènements déclenchés par des aléas naturels nous montrera par la suite, à quel point dans un contexte d'aléa climatique, les perturbations territoriales suscitées par les endommagements simultanés de plusieurs réseaux techniques contribuent à la propagation et l'aggravation des impacts mais aussi à la persistance du désordre et des situations dangereuses après l'évènement. Néanmoins, cet exemple met en avant une forme d'imprévisibilité des évènements liés aux réseaux et à la possibilité de certains réseaux, en l'occurrence électrique, de s'écrouler à partir de perturbations mineures.

Si les impacts indirects peuvent être disproportionnés par rapport aux impacts directs, cela implique qu'une part importante des dommages est liée aux phénomènes d'effets dominos et de défaillances en cascades. Ces effets dominos sont, entre autre, diffusés par l'intermédiaire des réseaux, nous parlerons alors d'effets de réseaux pour qualifier ces dynamiques d'aggravation et de diffusion des impacts initiaux. Dans le cadre de cette recherche, les effets de réseaux qui nous intéressent sont liés à des infrastructures de réseaux ; infrastructures de réseaux techniques ou de transports, celles-ci possèdent une matérialité qui les expose physiquement à des dommages externes.

1.1.2.3. La diversité des causes apparentes masque la récurrence de causes profondes

En complément d'une explication centrée sur l'importance des effets dominos dans la complexité des évènements à risques impliquant des coupures de réseaux, on peut nuancer les interprétations sur cette apparente disproportion entre les causes et les effets en reprenant une distinction établie par Blaikie entre les causes profondes et les causes contextuelles des catastrophes (Blaikie, al., 1994).

Pour illustrer cette idée, prenons un exemple classique : il est établi que la Première Guerre Mondiale a été déclenchée par l'assassinat de l'Archiduc d'Autriche François Ferdinand et son épouse, le 28 juin 1914 à Sarajevo, un évènement localisé précisément dans le Temps et dans l'Espace. Cet évènement constitue donc dans les manuels d'Histoire et toutes les chronologies de la Première Guerre, le point de départ du conflit. Pour autant, aucun historien ne considère que cet évènement « mineur » constitue la cause de la catastrophe, il est

simplement le point de déclenchement d'un conflit dont les causes sont bien plus profondes, complexes, incertaines et imprécises ; c'est un acte déclencheur et non un acte fondateur.

Aussi, on ne pourra pas comprendre les origines, les enjeux et le déroulement du conflit simplement à partir d'informations, aussi précises puissent-elles être, sur l'assassinat en lui-même. D'autre part, sans pour autant tomber dans une forme de « fatalisme historique » et oublier « comment la guerre est toujours à craindre et peut toujours être évitée » (Alain, 1913), on ne peut s'empêcher d'envisager l'hypothèse que compte tenu des tensions et de « l'effervescence » de cette époque (Alain, 1913), si cet assassinat n'avait pas eu lieu ou avait échoué, un autre incident en apparence très différent, aurait pu déclencher le conflit sans que les grandes lignes de celui-ci n'en soient profondément transformées.

De la même manière, toute proportion gardée, bien qu'il existe une forte imprévisibilité et une grande diversité dans la typologie des possibles perturbations (causes contextuelles) à l'origine des dysfonctionnements ou des endommagements des réseaux, on peut penser qu'il existe également des causes plus profondes et déterminantes pour la connaissance et l'anticipation de ces évènements et des vulnérabilités qui les rendent possibles. Si en apparence quelques secondes peuvent suffire à leur déclenchement et leur diffusion, certains évènements n'ont en réalité pu survenir qu'au terme d'un processus de « maturation » du système de risque.

Cette conception des risques et de la vulnérabilité des systèmes peut être rapprochée d'une observation de Jean Pierre Marchand qui explique à propos de la surfusion et de la métastabilité : « il semble qu'il y ait un lien entre la création et la destruction d'un système qui se rapprocherait de la surfusion. Le système est construit avant d'exister et un évènement aléatoire suffit à le déclencher. Il est détruit en germe, assez longtemps avant qu'une petite variation aléatoire suffise à le faire exploser. » (Marchand, 1984). Aussi, devant la diversité des scénarios et des aléas à l'origine du déclenchement des systèmes de risques de coupures de réseaux, on peut penser qu' « une grande quantité d'actions possibles sont susceptibles de servir de déclencheur ou de prétexte, quand les conditions sont réunies, quand la situation est mûre. » (Brunet, 2000).

Ce constat nous amène à considérer les systèmes de risques comme des forces en sommeil, des forces d'attraction du système territorial vers certains états de dysfonctionnements (en ce qui nous concerne par exemple un état de non approvisionnement durable en électricité, en télécommunication et en eau fortement dommageable pour la stabilité et la sûreté du système territorial), ces états, tout comme les forces qu'ils exercent, ne sont pas statiques et de nouveaux états ou de nouvelles forces peuvent apparaître, disparaître ou se transformer.

Par ailleurs, il est important de préciser qu'« une force n'est pas la conséquence mécanique d'un choc, c'est une action motrice par nature. Aristote avait déjà défini la physique des mobiles non séparés, comme science des choses qui possèdent en elles-mêmes un principe de mouvement. Leibniz pense à la gravité qui en tant que force existe, même si elle ne s'applique à aucun objet : si aucun objet n'était en train de tomber, on ne pourrait pas mesurer la gravité, mais celle-ci existerait quand même. » (Baudelle, Regnaud, 2004). Ainsi, au même titre que la force de gravité n'existe pas seulement quand la pomme tombe, les forces des systèmes de

risques sont préexistantes au moment où la crise est déclenchée par la perturbation. Considérant une certaine « confusion entre le déclenchement et les résultats. Au point que l'on prend parfois pour évènement quelque chose qui [tient davantage] d'une mutation, c'est-à-dire une transformation en profondeur, un changement de système » (Brunet, 2000), il semble qu'au-delà de leur dimension évènementielle et leur « révélation » par la perturbation, l'analyse des systèmes de risques suppose également de s'interroger sur les forces de désorganisation et de déstabilisation en sommeil dans l'organisation spatiale et réticulaire des systèmes territoriaux.

1.1.2.4. L'importance des causes contextuelles pour la spatialisation des systèmes de risque

Si dans le cadre d'un modèle explicatif d'ensemble et à petite échelle de « la systémogénèse » des systèmes de risques, les causes contextuelles du déclenchement peuvent paraître moins déterminantes que les causes profondes, il n'en est pas nécessairement de même quand l'objectif porte sur la spatialisation des systèmes de risques à échelle fine. Dans le cas des coupures électriques par exemple, même de très légères variations spatiales de l'aléa déclencheur sont susceptibles d'avoir un impact important sur la propagation des impacts indirects et la gravité du système de risque. Nous l'observerons dans le cas de trois coupures électriques dans le Var déclenchées par des incendies durant l'été 2003 ; pour trois incendies relativement proches les uns des autres et dans des conditions de consommations électriques assez semblables, la charge coupée, la localisation et la durée des pannes peuvent être fortement variables. De même, un décalage de simplement quelques heures du déclenchement du système de risque peut faire fortement varier la nature et l'importance des impacts de cette perturbation ; par exemple, on admettra aisément qu'une panne électrique dans une ville entre minuit et quatre heures du matin n'a pas le même impact sur le système urbain qu'une panne affectant les mêmes sous-espaces entre midi et quatre heures de l'après-midi.

Pour les évènements impliquant des effets de réseaux, les variations importantes des dommages et des trajectoires, induites par de légères variations spatiales ou temporelles du point de déclenchement du système de risques est un élément essentiel qui nous pousse à concevoir l'anticipation des systèmes de risques associés aux coupures de réseaux et de l'organisation spatiale et temporelle des dommages directs et indirects dans une logique exploratoire plutôt qu'une logique strictement prédictive. Nous y reviendrons plus en détail dans le chapitre suivant.

1.2. VULNÉRABILITÉ DES RÉSEAUX, STRUCTURE ET STABILITÉ DES SYSTÈMES COMPLEXES

1.2.1 Auto-organisation critique et distribution temporelle des coupures électriques

1.2.1.1. Des événements à petite échelle et des risques à l'échelle des réseaux

Une autre caractéristique des évènements associés aux défaillances en cascade des réseaux porte sur l'échelle des phénomènes. En considérant le réseau comme un système formant un tout, une globalité, on est amené à considérer également que la portée spatiale des dommages subis localement par une ou des composantes peut être relative à l'échelle spatiale de l'ensemble du réseau (qui en devient la forme spatiale du système de risque). Dans un contexte de globalisation et d'échanges mondiaux, de nombreuses infrastructures de réseaux qui supportent ces échanges fonctionnent elles-mêmes à une échelle globale ; assez logiquement, on en déduit que les risques associés à ces infrastructures peuvent être eux-mêmes globaux et que la vulnérabilité d'une composante possède des propriétés ubiquistes. Pour certains auteurs sur les risques et la vulnérabilité des réseaux, c'est même ce « changement d'échelle » des évènements et le passage « de risques locaux et relativement bien connus, vers des vulnérabilités nouvelles, face à des désastres beaucoup plus globaux, extrêmement coûteux et difficilement quantifiables, qui caractérise le mieux ce qu'il convient aujourd'hui d'appeler les nouveaux risques. » (Michel-Kerjan, 2006).

Les évènements à petite échelle spatiale ne sont pourtant pas une nouveauté. Si l'on prend l'exemple du réseau électrique, dès 1965, les mécanismes de défaillances en cascade dans le réseau électrique du Nord-Est des Etats Unis avaient conduit à une des plus grandes pannes électriques du pays (30 millions de foyers). En France, la plus grande panne électrique du pays reste en date du 19 décembre 1978, 75% du pays avaient alors été privés d'électricité. Toutefois, montrer que les évènements à petite échelle spatiale, liés aux défaillances des réseaux ne sont pas des phénomènes nouveaux n'exclut pas le fait qu'ils contribuent à une nouvelle forme de risque pour reprendre la formule citée précédemment. Pour poursuivre cette idée, si l'on prend une définition classique du risque comme le rapport entre la fréquence d'un évènement et le coût de l'ensemble de ces impacts, le fait d'envisager les coupures électriques à petite échelle comme un risque « nouveau » signifierait donc que la fréquence de ces évènements à petite échelle a augmenté ou (et) que le coût de l'ensemble des impacts directs et indirects de ces évènements a augmenté.

1.2.1.2. La distribution temporelle des pannes électriques et l'auto - organisation critique du système électrique

Etablir un « palmarès mondial » des plus grandes pannes électriques de l'histoire n'aurait pas réellement d'intérêt. Les progrès économiques, l'électrification encore inachevée mais rapide, récente et à petite échelle de pays très fortement peuplés comme l'Inde ou le Brésil, en font assez logiquement les pays où ont eu lieu les plus grandes pannes électriques recensées à l'échelle du Monde, avec plusieurs pannes géantes en Inde (220 millions d'habitants touchés en 1991, 300 et 670 millions en 2012) ou au Brésil (plusieurs évènements compris entre 50 et 100 millions depuis 1999). Sous les effets de la croissance de la consommation et du caractère « récent » du développement électrique de plusieurs pays très fortement peuplés, les plus grandes pannes à l'échelle du monde sont donc très logiquement recensées après le début des années 2000. Aussi, l'analyse globale et sur une longue période de l'évolution temporelle des coupures électriques à l'échelle du Monde est délicate et s'avère, compte tenu de l'indépendance entre plusieurs grands systèmes électriques, assez limitée pour comprendre les liens entre l'évolution du risque et la dynamique des réseaux.

Par contre, à l'échelle d'un système pris indépendamment, l'analyse de la distribution temporelle des coupures électriques constitue une piste de recherche explorée par de nombreux chercheurs considérant que la distribution statistique de l'ensemble des évènements affectant un système est plus porteuse de sens pour appréhender sa dynamique globale que l'analyse d'un cas spécifique. Comme le souligne Rosas dans son application au réseau électrique européen : « l'analyse des propriétés statistiques et dynamiques de séries d'évènements à partir de modèles généraux et approximatifs a été un des sujets les plus populaires ces vingt dernières années (…). Les réseaux de transport d'énergie électrique n'ont pas échappé à cette fascination pour la quête des lois de puissances. » (Rosas, 2009). Ainsi, dès 2001, en analysant les liens entre la taille (en fonction de la puissance coupée en megawatt) et la fréquence des coupures électriques, Carreras expliquait que « dans le cas du système américain comme du système européen, la probabilité de défaillances à grandes échelles apparaît plus importante que ce qu'on aurait pu attendre sur la base de l'extrapolation des petites coupures, ce qui s'avère symptomatique des systèmes auto-organisés critiques [SOC] et analogue au modèle du tas de sable » (Carreras, al., 2001, 2004).

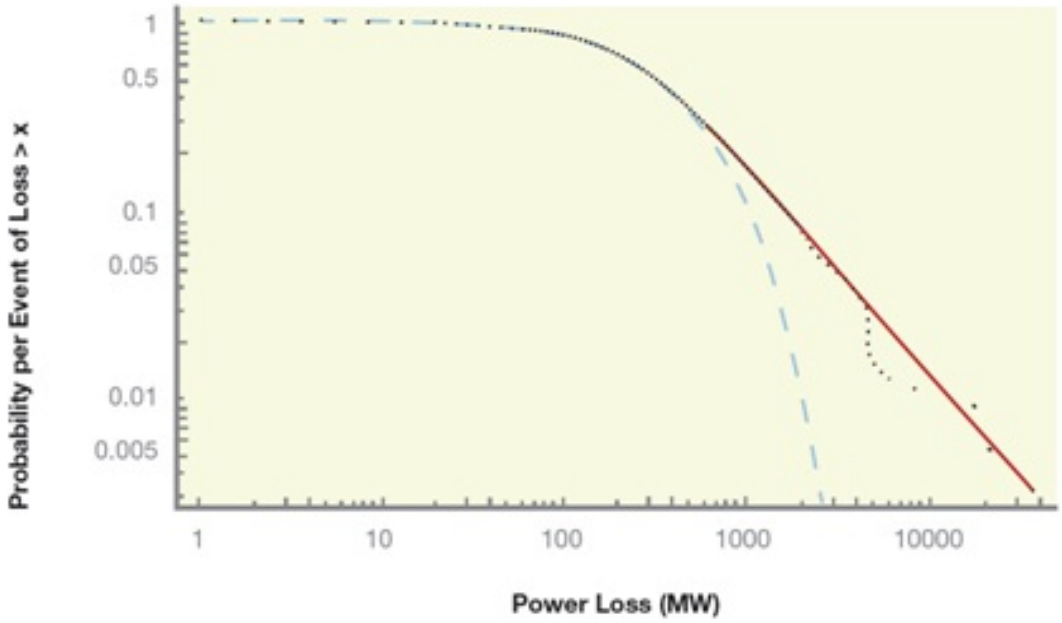


Figure 1 : Probabilités cumulées d'apparition des coupures électriques en Amérique du Nord en fonction de la quantité d'énergie non distribuée. La distribution exponentielle en trait hachuré est adaptée pour les petits évènements mais sous-estime nettement la distribution des évènements de grande taille. (Source : Jay Apt, 2004, à partir des données sur la distribution statistique de 15 années de pannes électriques sur le réseau américain NERC (1984-2000).

Dans la figure 1, l'analogie entre la distribution théorique obtenue à partir du modèle du tas de sable (en rouge) et la distribution statistique de 15 années de pannes électriques sur le réseau américain NERC (1984-2000), est assez nette. La courbe exponentielle (en hachuré bleu) sous-estime la probabilité et l'existence des grands évènements, elle correspond en fait à ce que Carreras avait désigné dans la citation précédente comme l'extrapolation des petites coupures.

La distribution en loi de puissance, qui suggère un comportement auto-organisé critique (Bak, 1999), permet d'expliquer la « surreprésentation » des évènements de grande ampleur par l'importance des défaillances en cascades et des avalanches dans le réseau, lorsque le dépassement de certains seuils de stress concorde avec l'apparition de perturbations de faible intensité. Même s'ils précisent que « le tas de sable n'est pas strictement un modèle de la dynamique du réseau électrique mais plus simplement un moyen de tester les propriétés d'auto-organisation critique de données statistiques » (Carreras et al 2001), ces derniers proposent également une interprétation plus qualitative de l'analogie entre la dynamique du système électrique à petite échelle et le modèle du tas de sable.

L'état du système électrique serait fonction de son niveau de charge (la pente dans le tas de sable), la hausse de la demande en électricité constituerait la force conductrice du système (l'ajout d'un grain de sable), les mesures et les réponses visant à limiter les coupures constitueraient la force de relâchement (la gravité) et la panne électrique serait l'écroulement du tas de sable. Dans cette logique, les mesures (techniques, pratiques, matériels) visant à limiter les pannes (la gravité) s'intègrent dans la dynamique globale d'évolution du système et participent de manière contre-intuitive à l'aggravation de la taille des pannes électriques.

Le comportement auto-organisé critique implique également que le système électrique évolue vers un seuil à partir duquel la probabilité de déclenchement d'une panne à petite échelle augmente brutalement et où de diverses perturbations faibles sont susceptibles de produire l'écroulement du système. Pour tenter d'identifier cet effet de seuil, Dobson et Carreras simulent le comportement dynamique du réseau électrique à partir du modèle OPA, modèle spécifique à la circulation des flux dans les réseaux électriques et prenant en compte l'évolution de la charge électrique sur des périodes longues (Dobson, Carreras, 2001).

Les résultats montrent que le niveau de charge du réseau est un facteur critique dans le déclenchement des pannes à petite échelle et qu'il existe bien un seuil dans le niveau de charge du réseau à partir duquel la taille moyenne des coupures augmente brutalement (figure 2). Le dépassement de ce seuil de charge place donc le système dans un état critique et de vulnérabilité importante.

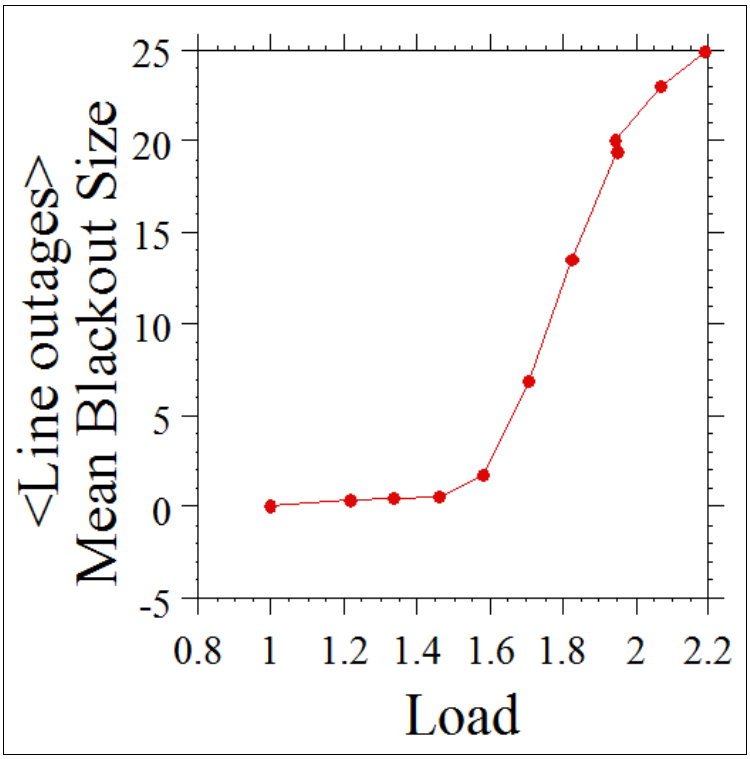


Figure 2 : Effet de seuil dans l'évolution de la taille des coupures électriques en fonction de la charge sur le réseau. (Source : Dobson, Carreras, 2001).

Par ailleurs, Talukdar établit un ensemble de propriétés sur les mécanismes de pannes à petite échelle des réseaux électriques, il consacre deux propriétés à la criticité, alors que la première est assez générale, la seconde insiste sur le fait que : « la proximité des variables d'état du niveau des seuils critiques varie dans le temps mais aussi dans l'espace » (Talukdar, 2006). Cette propriété signifie donc que certaines composantes du système sont plus proches de cet état critique que d'autres et donc, davantage à même de déclencher une coupure grave en cas de perturbation. Nous verrons dans la seconde partie de la recherche que cette propriété est d'une grande importance dans le cadre d'une approche territoriale et spatiale des systèmes de risques associés aux défaillances des réseaux.

Le transfert de la théorie des systèmes auto organisés critiques a déjà servi de fondements pour de nombreuses recherches appliquées aux risques dans les réseaux électriques de différents pays (Suède, Chine ou Norvège notamment). Si dans l'ensemble, ces recherches confirment des similitudes avec le modèle théorique, plusieurs limites sont également mises en évidence. Par exemple, on utilise généralement l'indicateur « quantité d'énergie non distribuée » comme indicateur synthétique pour qualifier « la taille des pannes ». Or d'autres indicateurs comme le pic maximum de clients coupés, la surface affectée, la durée ou encore leurs coûts directs et indirects peuvent à juste titre être considérés comme des valeurs de référence exploitables pour quantifier la taille de l'évènement électrique.

C'est d'ailleurs le choix développé par (Rosas, 2009, Solé, 2010) à partir des données du réseau UCTE entre 2002 et 2008. Sur la figure 3, les distributions statistiques correspondent aux mêmes évènements de cette période appréhendés en fonction de trois indicateurs:

- L'énergie non fournie : mesure de la quantité de perte d'énergie au niveau des consommateurs d'électricité (en MW/h).
- La quantité d'énergie perdue : mesure de la quantité de perte d'énergie au niveau des producteurs d'électricité (en MW).
- La durée de la coupure : qui est mesurée en minutes.

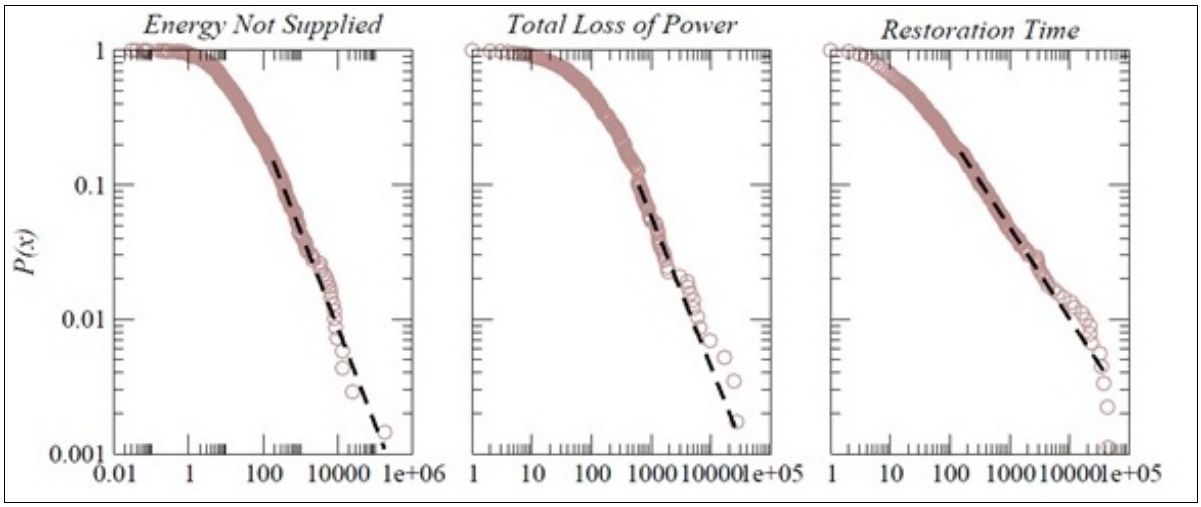


Figure 3 : Probabilités cumulées d'apparition des coupures électriques en Europe en fonction de la quantité d'énergie non distribuée, de la perte de charge et du temps de restauration. (Source : Rosas, Solé, 2010).

La loi de puissance semble statistiquement plausible pour l'indicateur ENS et RT mais est rejetée pour l'indicateur TLP. Les résultats sont assez contrastés et des écarts importants entre distributions réelles et distributions théoriques apparaissent pour l'ensemble des indicateurs, la loi de puissance n'expliquant que 10% des évènements en prenant l'indicateur TLP comme valeur pour la taille des coupures, 15% avec l'indicateur ENS et 17% avec l'indicateur RT : « l'hypothèse de l'existence d'un équilibre proche de l'état critique semble difficile à accepter pour le réseau UCTE, tout du moins à ce stade de l'analyse [peut être aussi à ce stade du développement du système électrique européen], et les résultats suggèrent que la majorité des dynamiques du réseau électrique devrait être expliquée par différents modèles dynamiques, autres que ceux qui génèrent des lois de puissances comme résultat statistique. » (Rosas, Solé, 2010).

Parallèlement aux analyses sur la distribution temporelle des dysfonctionnements des systèmes complexes (ici les pannes des réseaux électriques), qui mettent en lumière une fréquence des évènements de très grande ampleur plus importante que les modèles statistiques classiques ne le laissent penser ; les recherches sur les organisations réticulaires ont permis de de formaliser plusieurs structures théoriques, auxquelles sont associées des propriétés qui contribuent à expliquer certains types de comportements dynamiques des systèmes complexes et notamment les pannes à petites échelles provoquées par des incidents ponctuels *a priori*

mineurs. Dans la suite de chapitre, nous tenterons donc de préciser ces liens supposés entre l'organisation et la stabilité des réseaux.

1.2.2. Les liens entre structure et stabilité des réseaux.

1.2.2.1. L'organisation hétérogène et hiérarchique des réseaux scale-free et l'émergence de nœuds critiques

Les réseaux réguliers et aléatoires se caractérisent par une certaine homogénéité, c'est-à-dire que la distribution de la connexité des nœuds suit une loi gaussienne de telle sorte que la majorité des nœuds possède en moyenne un nombre de liens connexes relativement proches. Les réseaux dits scale-free (glossaire), sont en revanche caractérisés par une forte hétérogénéité, la distribution de la connexité des nœuds suit une loi de puissance de telle sorte que parmi l'ensemble des nœuds, un faible nombre de nœuds possède un très grand nombre de nœuds connexes, alors qu'un grand nombre de nœuds est connecté à un nombre de postes plus faible. Les réseaux scale-free se développent à partir du principe « d'attachement préférentiel » (figure 4, 5) (Barabasi, Albert, 2003), c'est-à-dire que les nouveaux liens vont s'établir davantage avec des nœuds qui disposent déjà d'une forte connexité ; va donc émerger une hétérogénéité plus importante dans le réseau, un ou des hubs structurent l'organisation de « microsystèmes » et polarisent un réseau fortement clustérisé. Le processus n'est pas sans rappeler la croissance des réseaux urbains où, « au cours du temps, accessibilité dans les réseaux et hiérarchie des lieux centraux se renforcent mutuellement » (Pumain, Saint Julien, 2001).

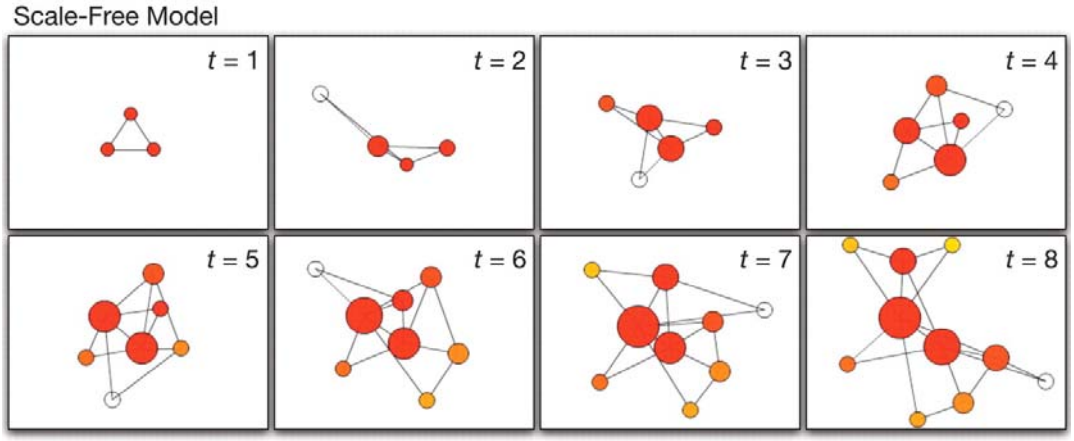


Figure 4 : Le principe d'attachement préférentiel et le développement continu de l'hétérogénéité vers une structure de réseau scale-free.

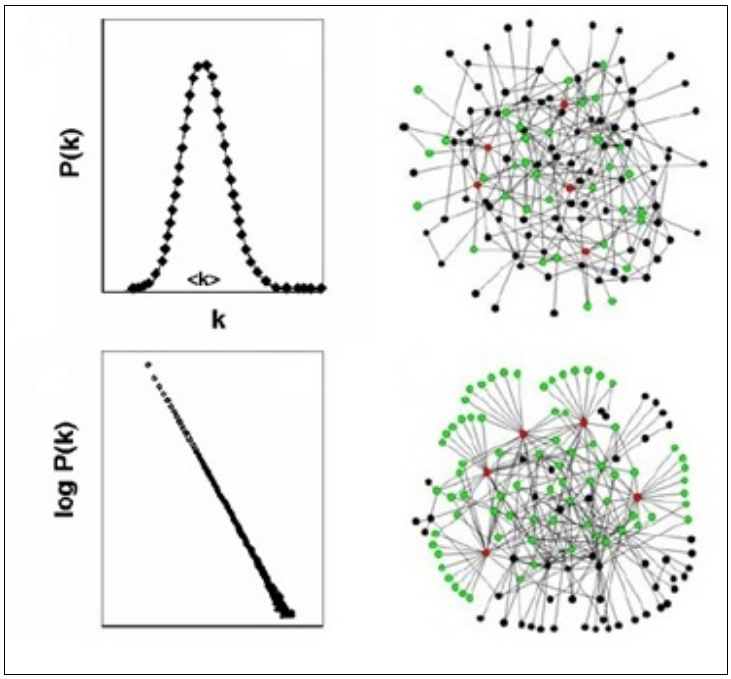


Figure 5 : Structure et connexité dans les réseaux aléatoires (haut) et réseaux scale free (bas). (Source : Barabasi et al., 2003).

Les réseaux-scale free disposent comme les réseaux « small world » (glossaire) d'une longueur moyenne des chemins optimaux de point à point assez faible ; on peut donc considérer qu'ils contribuent à une organisation efficace en termes de circulation des informations et optimisent les échanges. D'autre part, les réseaux scale-free se caractérisent par une structure fortement hiérarchisée qui repose aussi sur l'agrégation successive de sous-systèmes fortement interconnectés localement : « Nous ne devrions pas concevoir la modularité comme la coexistence de groupes de nœuds relativement indépendants, nous disposons de nombreux petits groupes de nœuds, fortement [intra]connectés, qui se combinent pour former un système plus grand mais moins cohésif, qui se combine à nouveau pour former un réseau encore plus grand et encore moins interconnecté. » (figure 6) (Barabasi et al, 2003).

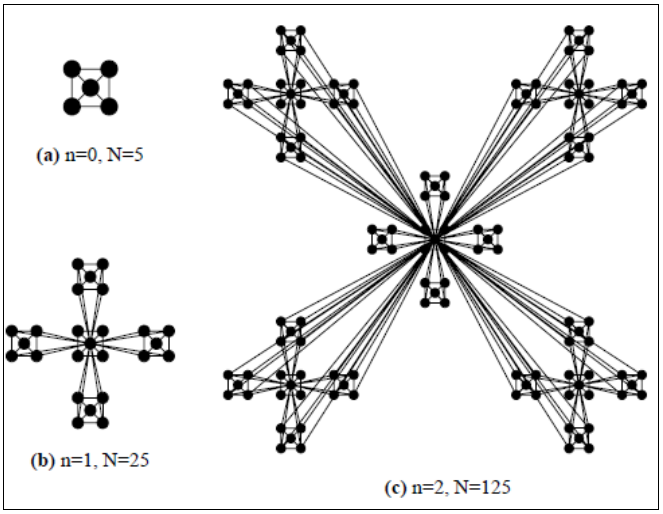


Figure 6 : Modularité et dimension hiérarchique dans les réseaux scale-free. (Source : Barabasi et al., 2003).

D'un point de vu général, ce processus de croissance hiérarchique des réseaux concorde assez bien avec le modèle de croissance du réseau électrique observé en France et en Europe depuis plus d'un siècle : les réseaux électriques se sont d'abord constitués à l'échelle des régions dans la première moitié du 20ème siècle (figure 7), puis à l'échelle de la France par l'interconnexion des systèmes régionaux et progressivement à l'échelle de l'Europe par l'interconnexion des systèmes nationaux et le renforcement des liaisons transfrontalières.

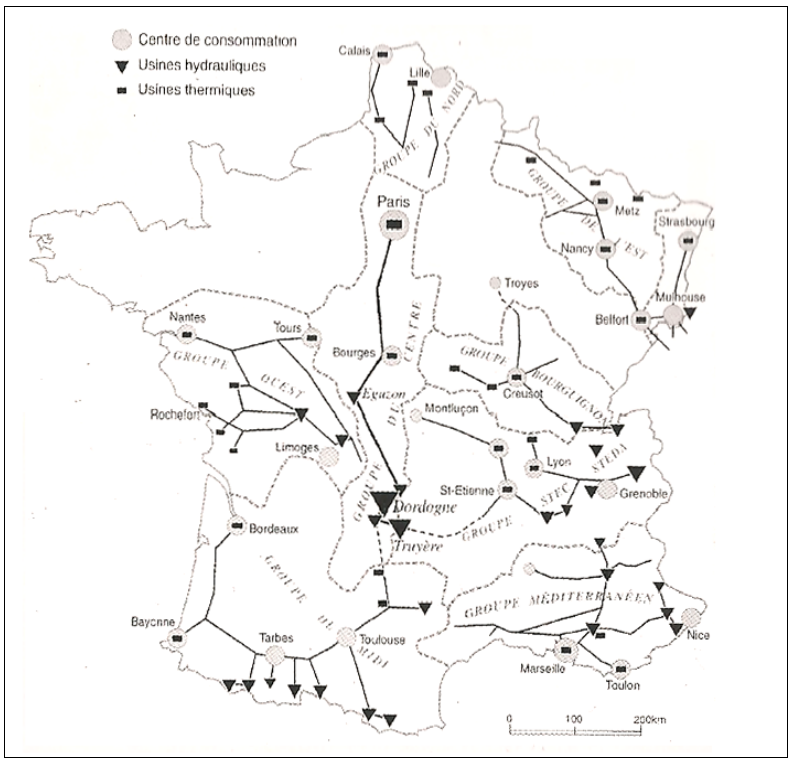


Figure 7 : Les groupes d'interconnexion au début des années 1930. (Source : Renaud, 1931, cité dans Bouneau et al., 2007).

On retrouve donc dans la croissance des réseaux électriques, l'idée de plusieurs sous-systèmes locaux cohésifs (les groupes électriques régionaux), qui s'interconnectent et forment un système plus large mais moins cohésif (l'unité électrique en France à partir de 1946, puis la réorganisation spatiale et la création des interconnexions à 400 kV), enfin le développement des liaisons avec d'autres réseaux nationaux pour former un système à l'échelle européenne. Même si ce parallèle entre la méthode de construction des réseaux « scale-free » et le développement des réseaux électriques à petite échelle ne semble pas dénué d'intérêt, plusieurs réserves sont à prendre en compte sur les limites du transfert des propriétés des réseaux « scale-free » au réseau électrique.

On peut notamment faire référence aux travaux de Paul Hines (figure 8) qui ont montré que la distribution de la connexité des nœuds du réseau électrique Est-américain (tracé en bleu) ne correspondait totalement ni au modèle des réseaux aléatoires (vert), ni à celui des réseaux petits mondes (jaune), ni à celui des réseaux scale-free (rouge). Ainsi, comparativement à un réseau aléatoire, le réseau électrique américain montre bien une surreprésentation de nœuds fortement connectés (en particulier pour les nœuds comportant plus de 10 nœuds connexes),

mais cette surreprésentation qui témoigne la présence de « hubs » est nettement moins marquée que dans le cas des réseaux scale-free.

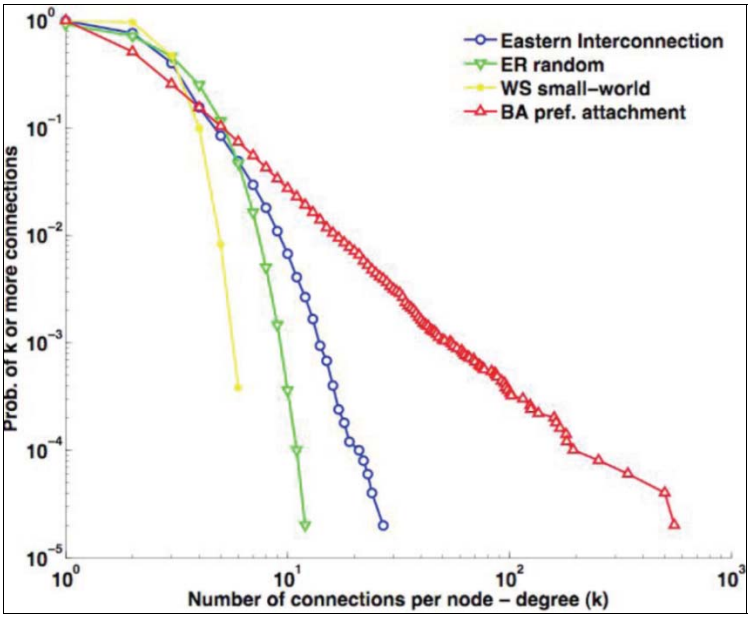


Figure 8 : Comparaison du réseau d'interconnexion électrique de l'Est Américain avec des structures théoriques de références. (Hines, 2010).

Sur un plan plus général, la concordance de ce modèle théorique scale-free semble globalement donner des résultats statistiques plus performants avec les réseaux virtuels, immatériels ou relationnels (Internet, réseau d'échange, réseau d'acteurs) qu'avec les réseaux physiques (infrastructures techniques ou routières par exemple). Cet élément qui mériterait d'être exploré plus en détails, pourrait mettre en avant une nouvelle fois, les distorsions qui peuvent apparaître lors du transfert de modèles généraux et a-spatiaux vers des thématiques et des réalités matérielles fortement influencées par des contraintes et des potentialités spatiales et géographiques.

La figure 9, présentée dans la sous-partie suivante est d'ailleurs assez révélateur de ce symptôme : les connexions du réseau scale-free ne sont pas représentées sur la surface terrestre et semblent s'affranchir des rugosités spatiales comme s'il s'agissait d'un réseau virtuel ou d'un réseau aérien. Inversement, l'autre réseau de la figure est représenté exclusivement avec des liaisons terrestres, dont le tracé irrégulier laisse imaginer qu'il aurait pu être organisé en fonction des contraintes spatiales. Certes, on peut considérer que l'exemple est un peu rapide et témoigne sans doute davantage d'un problème de représentation graphique que d'un problème de fond ; on pourra au moins lui attribuer le mérite d'une valeur symbolique.

Sur un plan plus spécifique au réseau électrique, le caractère limité de la capacité des charges à un poste de transformation électrique laisse également penser qu'il existe un seuil dans le degré de connexion des postes de transformation : un poste électrique ne peut pas supporter une infinité de lignes ce qui aurait tendance, *a priori* à limiter l'hétérogénéité dans le réseau.

1.2.2.2. Des réseaux à la fois robustes et fragiles

Nous avons débuté ce chapitre à partir d'une citation de Jacques Theys qui mettait en valeur la dimension chaotique et la disproportion entre les causes et les effets dans les systèmes de risques. La citation que nous emprunterons à nouveau à cet auteur met cette fois en valeur la nature antinomique des objets complexes, en l'occurrence celle des réseaux : « la complexité produit autant la diversité que la centralisation ; l'interconnexion des réseaux peut aussi bien réduire que faire croître les dépendances ; le progrès technique supprime autant de vulnérabilité qu'il en crée » (Theys, 1987). Pour qualifier cette nature antinomique des objets complexes, Morin définit le concept de dialogique en expliquant qu'« il n'est pas suffisant pour concevoir le principe de complexité d'associer les notions antagonistes de façon concurrente et complémentaire. Il faut considérer aussi le caractère même de l'organisation qui transforme chacun de ces termes dans le processus de bouclage. » (Morin, 1977, cité par Le Moigne, 1999). Dans cette sous-partie nous essaierons de comprendre les mécanismes dialogiques entre robustesse et fragilité dans les réseaux complexes.

Par la juxtaposition de deux termes opposés « Robust Yet Fragil », la propriété RYF observée dans les réseaux complexes comme Internet (Doyle, 2005) et qu'on retrouve dans les réseaux scale-free (Albert, Barabasi, 2003), qualifie des systèmes qui résistent assez bien à des perturbations aléatoires, mais sont par contre « hypersensibles » à des attaques ciblées sur des nœuds stratégiques. La dynamique de ces systèmes peut donc faire émerger des crises globales à partir de perturbations ponctuelles. Inversement, comme on peut le voir dans la figure suivante, les réseaux aléatoires ou réguliers, de par leurs structures plus homogènes, sont plus vulnérables à des destructions de nœuds tirés de manière aléatoire, mais ne montrent pas d'augmentation de la sensibilité à des attaques ciblées sur les nœuds les plus connectés du réseau.

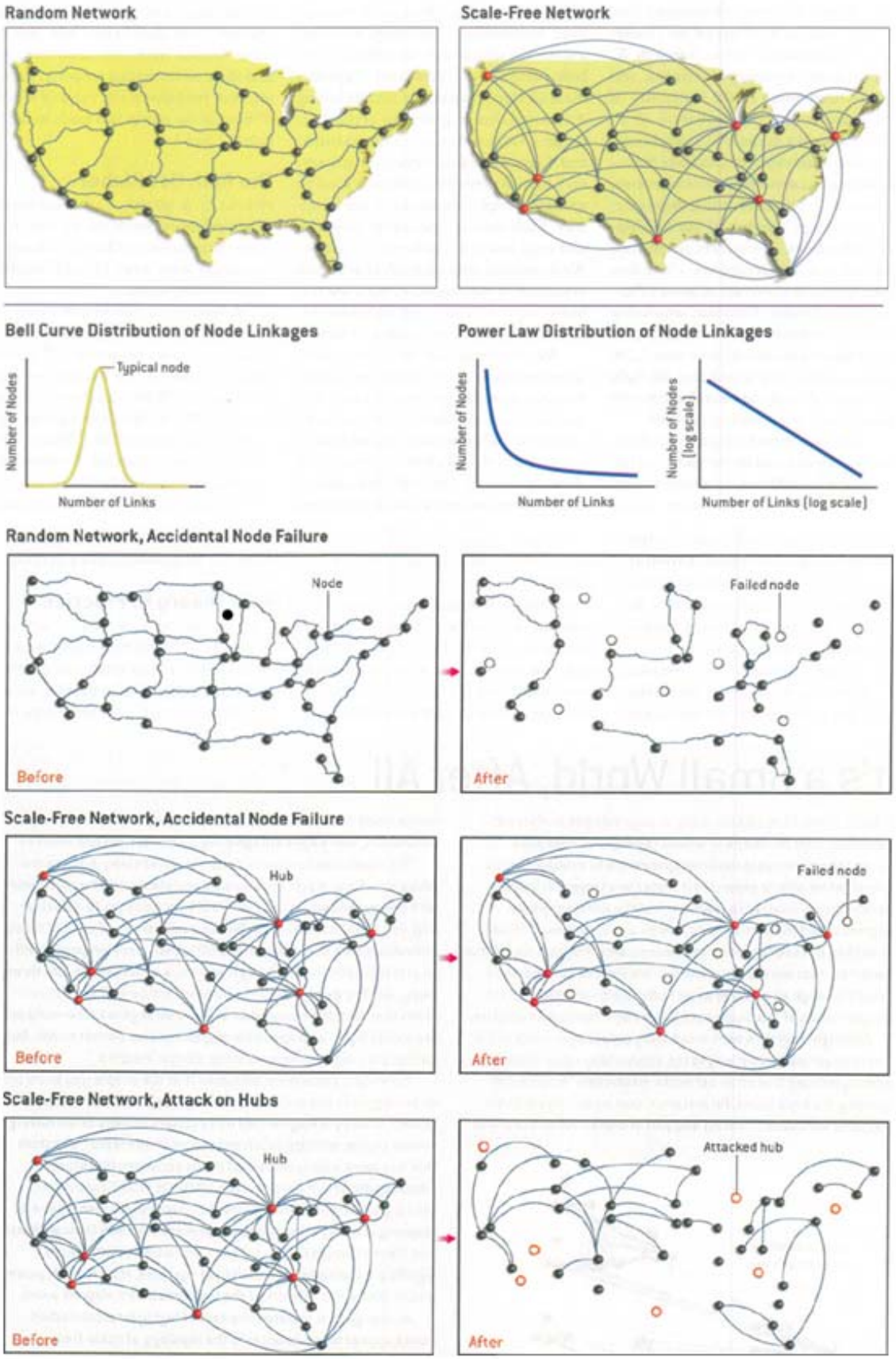


Figure 9 : La vulnérabilité des structures scale-free aux attaques ciblées (Source : Barabasi, Bonabeau, 2002).

D'un point de vue théorique, sur une période longue, la transition progressive des réseaux de transport électrique d'un modèle aléatoire ou régulier et faiblement hiérarchisé, vers un modèle « scale free», ou du moins fortement hétérogène et hiérarchisé, est une hypothèse séduisante pour expliquer la dialogique fragilité – robustesse dans la croissance des réseaux électriques et qui se manifeste par :

- Une tendance sur une longue période à la diminution du temps de coupure moyen et du taux de panne par équipement. (Temps moyen de coupure électrique en France en 1980 = 400 minutes, 2000 = 50 mn, 2010 = 84mn)
- Une concomitance avec l'augmentation marquée du risque de cascade à petite échelle des défaillances dans les réseaux et du risque coupure généralisée.
- Alors que replacée dans le contexte sociétal, la gravité des impacts économiques et sanitaires associés aux coupures a augmenté.

En gagnant en complexité, la croissance de certains réseaux pourrait donc s'orienter « par nature » et recherche d'optimalité vers une structure de plus en plus hiérarchique et différenciée contribuant à améliorer son efficacité, sa résistance et sa résilience face à des perturbations aléatoires, même d'intensité importante.

Toutefois en parallèle, la différenciation des composantes du réseau, liée au principe d'attachement préférentiel, induit une dépendance différenciée du système vis-à-vis de ses différentes composantes, ce qui dans le cas des réseaux fortement hétérogènes comme les réseaux scale free, où un petit nombre de hubs concentrent une partie importante des liens du réseau, se manifeste par une forme d'hypersensibilité à certaines perturbations mineures mais localisées stratégiquement. « Nos sociétés complexes ne sont plus qu'enchevêtrements de nœuds, de hubs, concentrant des pouvoirs de diffraction colossaux. Des effets [de]déstructuration massifs sont désormais dans le champ des possibles – mais ils sont hors de nos paradigmes de référence » (Lagadec, 2003).

1.2.3. La détection des nœuds critiques et la vulnérabilité des composantes du réseau

1.2.3.1. Des hypersensibilités locales

C'est justement cette forme d'hypersensibilité locale du système qui peut expliquer en partie pourquoi dans les systèmes de risques associés aux défaillances des réseaux techniques, une petite cause peut produire de grands effets et inversement une grande cause peut ne produire que de petits effets (une grave inondation à Marseille produit une coupure électrique de 50 000 foyers alors qu'une chute d'arbre dans une forêt varoise produit par effets boules de neige la coupure de plus d'un million de personnes).

Cette hypersensibilité locale n'est d'ailleurs pas si loin d'une situation que René Thom avait formalisée sous le nom de postulat EL, formulé comme suit : « le caractère plus ou moins déterminé d'un processus est déterminé par l'état local de ce processus. Pour tout processus satisfaisant à (EL), on est ainsi conduit à distinguer deux types de régions ; les régions où le

processus est bien déterminé et structurellement stable et les zones d'instabilité et d'indétermination. (…) qui sont le siège de catastrophes généralisées » (Thom, 1977). Même si nous ne nous référons pas explicitement à la théorie des catastrophes dans cette recherche et que nous ne pouvons prétendre qu'à une compréhension très partielle de la majorité des écrits de son auteur, il nous paraît intéressant de rapprocher ce postulat EL de nos réflexions sur les systèmes de risques.

En effet, les hypersensibilités locales associées à l'évolution des réseaux que nous décrivions précédemment dans le cadre des structures réticulaires peuvent être perçues comme le développement des « zones d'instabilité et d'indétermination », susceptibles dans certains contextes de devenir des points de basculement des systèmes de risques et engendrer des « catastrophes généralisées ». Ces régions constituent donc un enjeu important pour la compréhension et l'anticipation des systèmes de risques. Par opposition à ces nœuds critiques qui ouvrent un grand champ de possibilités d'impacts et de trajectoires du système de risques, les autres nœuds du réseau sont stables et ne peuvent, *a priori*, produire le même niveau d'indétermination et d'imprévisibilité à l'échelle du système. Le niveau de prévisibilité du système de risque pour un système spatio-réticulaire donné serait donc relatif au niveau de prévisibilité du sous-espace le plus imprévisible de ce système spatial.

On retrouve un principe lié à la variabilité spatiale de la criticité soulignée par Talukdar dans le cadre des grandes pannes du réseau électrique (Talukdar, 2002) ; au même titre qu'il existe des moments critiques, où compte tenu de certains franchissements de seuils, le système est particulièrement vulnérable, il existe des nœuds critiques, des points de basculements à partir desquels la catastrophe généralisée a plus de chance d'être déclenchée.

1.2.3.2. La mesure des propriétés relationnelles des nœuds du réseau et la détection des composantes critiques

Nous désignons par composantes critiques, les nœuds ou arcs du réseau dont l'endommagement est susceptible d'avoir des impacts importants sur les autres composantes du réseau. Pour identifier ces nœuds critiques, plusieurs techniques plus ou moins compliquées sont envisageables et possibles selon le type de réseau qu'on souhaite analyser. De manière simple, on peut considérer dans un premier temps que plus un nœud possède d'entités connexes plus son endommagement est susceptible d'impacter fortement l'ensemble du système. Toutefois, l'hypothèse de connexité = criticité est un raccourci un peu simpliste dans la majorité des cas. Dans le cadre des réseaux électriques, il n'est pas envisageable de tester le retrait de chaque lien un à un et encore moins l'ensemble des combinaisons de plusieurs liens possibles. Il s'agit alors d'adopter une stratégie de ciblage des nœuds à retirer du réseau. Les modélisations et les simulations des défaillances en cascade dans les réseaux techniques peuvent recourir à quatre modes opératoires différents pour sélectionner les nœuds à « retirer » initialement du système.

- Les attaques aléatoires, où les nœuds du réseau possèdent une équiprobabilité d'être endommagés.

- Les attaques dites « ciblées », dont la stratégie consiste le plus souvent à retirer du système réseau, les nœuds fortement connexes ou fortement chargés en courant dans le cas des réseaux électriques.
- Les attaques ciblées avec une stratégie inverse, sont plus récentes, plus rares et produisent des résultats plus controversés ; elles consistent cette fois à éliminer un ou des liens possédant une faible connexité ou une faible charge en courant pour le cas des courants électriques, afin d'en mesurer l'impact sur la stabilité du système.
- La quatrième catégorie correspond à des modèles où le dommage au réseau s'intègre dans un système de risques plus complexe, avec une prise en compte des interactions entre le système technique et le système environnemental. Les nœuds possèdent alors une probabilité d'endommagement relative en fonction de leur localisation dans l'espace et leur degré d'exposition potentielle à une perturbation d'origine naturelle (séisme, tempête, inondation). Dans le cadre de la distinction que nous avons établie entre d'un côté, le traitement des risques par la science des réseaux et de l'autre le traitement des réseaux par la science des risques, cette stratégie de ciblage des nœuds est surtout employée par la deuxième catégorie et sera donc traitée dans la partie 3 de ce chapitre.

S'ils confirment le caractère plus vulnérable du réseau de transport électrique de l'Ouest de Etats Unis aux attaques ciblées qu'aux attaques aléatoires (propriété RYF), les travaux récents de Wang et Rong tendraient à démontrer que le risque de défaillances en cascade à grande échelle dans le réseau électrique américain augmenterait non pas quand les attaques sont ciblées sur les nœuds les plus connectés du réseau mais à l'inverse quand ces attaques sont ciblées sur les nœuds les moins connectés du réseau : « les attaques sur les nœuds avec la charge la plus faible sont un moyen plus efficace de détruire le réseau de transport électrique de l'Ouest des Etats Unis à partir de défaillances en cascades » (Wang, Rong, 2009).

La validité de ces résultats contre intuitifs soulève néanmoins des réserves (Hines, 2010) portant essentiellement sur la capacité des règles topologiques « classiques » à simuler les relations dynamiques d'un réseau électrique et donc plus largement la diffusion des défaillances dans les réseaux électriques. Dans le contexte des réseaux de transport routier, la méthode la plus courante pour évaluer la vulnérabilité structurelle, liée aux « potentialités de la trame » (Gleyze, 2003, 2005) et identifier des nœuds critiques, consiste à calculer un indicateur de performance à l'échelle globale du réseau, puis à mesurer l'évolution de celui-ci en supprimant successivement les différents liens. La criticité d'une composante du réseau se mesure alors par l'écart entre les valeurs d'un indicateur global de performance avec et sans sa propre présence dans le réseau. Un écart important signifie que la composante du réseau contribue beaucoup dans le fonctionnement du réseau et que son endommagement s'avère très pénalisant.

Pour mesurer la performance des réseaux (avant et après endommagement), plusieurs types d'indicateurs dérivés de la théorie des graphes sont mobilisés dans les recherches sur la vulnérabilité des réseaux de transport. Il est ainsi possible d'analyser l'effet de la destruction du lien sur la variation statistique d'un indicateur global à l'échelle du réseau comme la somme des temps de déplacements entre tous les sommets du graphe (Chapelon, Appert 2001). On peut également trouver des travaux où la vulnérabilité structurelle du réseau est

analysée en fonction de la variation d'indices locaux comme par exemple l'indice de centralité intermédiaire qui mesure le nombre de fois où un nœud s'inscrit dans un itinéraire de plus court chemin (Freeman, 1978, Gleyze, 2003).

Une distinction importante dans l'évaluation de ces vulnérabilités porte sur la manière de considérer le réseau dans la modélisation. Certaines recherches intègrent de manière primordiale les flux dans l'évaluation de la vulnérabilité des réseaux ce qui permet d'envisager des problèmes de congestion induits par les reports de charges suite à l'endommagement d'un ou de plusieurs liens (Chapelon, Appert 2001, Voiron, Olivier, 2003). D'autres recherches intègrent de manière primordiale les structures, la topologie des réseaux et privilégient par exemple la notion de plus court chemin pour définir les nœuds dont l'endommagement s'avère le plus impactant pour le réseau (Gleyze, 2003).

1.2.3.3. L'importance des liens faibles dans la généralisation des catastrophes

L'importance des liens faibles dans la diffusion à petite échelle avait déjà été identifiée dans les travaux sur les réseaux sociaux et les liens interpersonnels (Granovetter, 1973). Les liaisons à l'intérieur des sous-groupes d'individus sont fortes et exhaustives, chaque membre possède un lien avec une partie importante des membres du sous-groupe ; les sous-réseaux sont donc fortement connectés et renvoient à ce que l'on pourrait appeler « les cercles de proches ».

Parmi ces sous-groupes, certains membres partagent un lien avec un élément appartenant à d'autres sous-groupes, ce qui permet la connectivité de l'ensemble du réseau. Même si elles sont de faibles intensités (par exemple moins fréquentes dans le cadre des réseaux sociaux), ces liaisons conditionnent la diffusion d'une information à l'ensemble des composantes du réseau et permettent donc à chaque composante d'être reliée à toutes les autres par un chemin assez court.

Du fait de leur positionnement dans le réseau à l'interface de plusieurs sous-groupes, certaines composantes du réseau revêtent une importance stratégique alors que d'autres sont plus négligeables ; ce ne sont donc pas forcement les nœuds les plus connectés qui permettent la diffusion à l'échelle globale. Ainsi, en prenant l'exemple du marché du travail et de la recherche d'emplois, Granovetter montre bien que pour trouver un emploi, le recours à des liaisons faibles permet de couvrir un champ de recherche bien plus important que des liaisons fortes.

1.3. LES RÉSEAUX DANS L'ANALYSE ET LA GESTION DES RISQUES

On a jusqu'à présent abordé le risque et la fragilité essentiellement du point de vue des sciences sur les réseaux ou dans une optique de stabilité des systèmes ; on a pu voir, théoriquement, que les réseaux pouvaient évoluer vers une structure à la fois robuste et fragile, dans laquelle certains nœuds plus que d'autres pouvaient être critiques dans la trajectoire de fonctionnement du réseau. Cette sous-partie est davantage orientée vers le traitement des réseaux techniques et les infrastructures dans l'analyse et la gestion du risque.

Trois catégories majeures de travaux sont abordées, d'abord ceux dédiés à la vulnérabilité des infrastructures critiques, puis ceux concernant la vulnérabilité des réseaux techniques face aux aléas climatiques et enfin, ceux qui traitent de la problématique de l'interdépendance des réseaux techniques de nature différente.

1.3.1 Le concept d'infrastructures critiques

1.3.1.1. Un concept institutionnel à définition variable et aux orientations évolutives avec les menaces du moment

S'il n'existe pas une définition stricte des infrastructures critiques, un rapport de l'OTAN établit une distinction nette entre deux conceptions de la criticité d'une infrastructure. La conception rattachée entre autre à la France, établit la criticité en fonction de la finalité ou l'objet de l'infrastructure, une infrastructure est critique parce qu'elle fournit quelque chose de vital, on retrouve ainsi dans les définitions françaises la notion de satisfaction des besoins vitaux (LMSC, 2004). La conception la plus généralisée établit toutefois la criticité en fonction de « la gravité ou les effets sur la société de la destruction de l'infrastructure ou les dommages qui lui sont infligés » (OTAN, 2007)

Les catégories d'infrastructures qui sont considérées comme critiques peuvent d'ailleurs fortement varier selon les recherches, de plus de 37 dans un rapport de la Commission européenne (UE, 2005), à 20 dans un rapport pour le Congrès Américain (Moteff, al., 2003) ou encore 17 dans les travaux plus spécifiques sur les réseaux de support à la vie développés au Canada. Par ailleurs, certains travaux considèrent exclusivement des infrastructures matérielles, d'autres étendent la définition également à des organisations (l'armée, la sécurité civile) ou des laboratoires pharmaceutiques avec la notion de secteur critique.

Secteurs	Sous-secteurs
Alimentation	Approvisionnement en eau potable
	Approvisionnement en denrées alimentaires
Autorités	Biens culturels d'importance nationale
	Instituts de recherche
	Parlement, gouvernement, justice, administration
	Représentations diplomatiques et sièges d'organisations internationales
Élimination des déchets	Déchets
	Eaux usées
Energie	Approvisionnement en électricité
	Approvisionnement en gaz naturel
	Approvisionnement en pétrole
Finance	Assurances
	Banques
Industrie	Industrie chimique et des médicaments
	Industrie des machines, des équipements électriques et des métaux
Information et communication	Médias
	Technologies de l'information
	Télécommunications
	Transport postal
Santé publique	Laboratoires
	Soins médicaux et hôpitaux
Sécurité publique	Armée
	Organisations de première intervention (police, sapeurs-pompiers, service de sauvetage sanitaire)
	Protection civile
Transports	Transport aérien
	Transport ferroviaire
	Transport naval
	Transport routier

	Criticité très élevée	-> Tous les sous-secteurs sont critiques.
	Criticité élevée	-> La criticité d'un sous-secteur exprime son importance pour les autres sous-secteurs, la population et l'économie (≠ importance en général, ni son importance lors d'une intervention).
	Criticité régulière	-> Les sous-secteurs à criticité normale sont susceptibles de contenir des éléments isolés très critiques.
		-> Cette appréciation de la criticité correspond à une situation normale.

Tableau 1 : Stratégie PIC (protection des infrastructures critiques) et recensement de secteurs critiques (Source : Office Fédéral de la Protection de la population, Suisse, 2012).

Comme on peut le constater sur le tableau 1, les systèmes techniques caractérisés par une infrastructure « physiquement » en réseau (électrique, eau, transport, gaz ou télécommunication) constituent une catégorie importante mais non exclusive d'infrastructure critique. La question des infrastructures critiques dépasse donc le cadre de la problématique des réseaux interconnectés et peut intégrer des infrastructures ponctuelles dans l'espace, comme une caserne militaire ou un laboratoire pharmaceutique, susceptibles d'avoir une influence forte sur une partie importante du système spatial s'il venait à être impacté. Une première étape marquante dans la formalisation des enjeux de protection des infrastructures critiques est souvent rattachée à un rapport pour la Défense Nationale américaine de 1998. Les auteurs mettaient en avant « les nouvelles dimensions de la vulnérabilité » et la gravité des risques induits par « la prolifération et l'intégration rapides des systèmes de télécommunication et des systèmes informatiques qui ont lié les infrastructures les unes aux autres pour parvenir à un réseau complexe d'interdépendances.» (US 1998, cité par Lagadec, 2005).

Dans un second temps, en particulier depuis le 11 septembre 2001, l'expression « infrastructure critique » est devenue une sorte de « buzz word » des programmes de défense américain puis européens (Birchmeier, 2007), sans pour autant posséder une définition stricte. La question des menaces intentionnelles, du terrorisme, des cyber-attaques prend alors une importance croissante dans les textes et études sur la protection des infrastructures critiques. Enfin, dans un troisième temps, la question des menaces naturelles est progressivement intégrée aux infrastructures critiques, faisant suite à des évènements d'ampleur exceptionnelle comme les dommages catastrophiques du cyclone Katrina.

Progressivement, les infrastructures critiques ont donc évolué à partir d'un champ de menace centré sur internet, une menace d'origine virtuelle et l'interdépendance des réseaux techniques, vers un champ de menace élargi à la question du terrorisme et de la protection physique des infrastructures, pour englober finalement l'environnement et les enjeux d'évènements hors cadres. Par ailleurs, les approches suggèrent « trois critères pour l'identification d'infrastructures potentielles, l'étendue de la région susceptible d'être touchée, le degré de gravité et l'effet dans le temps » (OTAN, 2007). La question de la diffusion spatiale des dommages, du lien entre l'infrastructure ponctuelle et la fragilité globale du système est donc au cœur de la démarche de détection des infrastructures critiques.

Pour Galland (Galland, 2010), malgré ses ambiguïtés, la notion d'infrastructure critique introduit trois aspects intéressants :

- La prise en compte des nouvelles formes de terrorisme, en intégrant des scénarios d'attaques ciblées ou par le réseau internet, par exemple.
- Les enjeux des connexions et des dépendances.
- Le partenariat des acteurs publics et privés pour la sécurité.

Même si dans l'ensemble, le concept d'infrastructure critique est presque exclusivement orienté vers des menaces à échelle nationale, ce qui le disqualifie dans le cadre de notre recherche plus orientée vers les menaces à l'échelle régionale ou urbaine, sur un plan conceptuel, néanmoins, le concept de « vulnérabilité des infrastructures critiques » nous paraît intéressant dans la mesure où il permet d'articuler à l'échelle d'une composante spatiale, les deux dimensions du risque, la vulnérabilité, propension à subir des menaces, et la criticité, comme propension à agir comme une menace.

1.3.1.2. Informations stratégiques et enjeux de confidentialité

La démarche de protection des infrastructures critiques comprend en amont, une démarche de recensement et de description des établissements recensés en termes de menaces et d'impacts. Le 5 décembre 2010, Wikileaks publiait un document classifié secret, intitulé «Liste des infrastructures critiques américaines ». Cette liste établie par le département de la sécurité intérieure américain comportait plus de 200 sites stratégiques dans le monde, exclusivement en dehors du sol américain, mais dont l'endommagement possèderait un impact critique sur la sécurité du territoire américain.

La question de la confidentialité et de la sécurité des données stratégiques que peuvent contenir les informations relatives aux infrastructures critiques mérite des précisions et soulève plusieurs débats, notamment si l'on met en parallèle :

- le fait que dans un contexte où des menaces intentionnelles sont envisageables, connaître ses faiblesses est une force, mais en informer les autres, peut revenir à se créer une nouvelle faiblesse ;
- l'accès aux données et à l'information peut être à la fois un moyen de développer de nouvelles connaissances sur la fragilité et répond aussi aux besoins d'informations des populations (en particulier celle sur les risques).

Au-delà des enjeux de sécurité que pose la diffusion de ce type d'informations, qui s'avèrent au final assez limitées et sans doute surmédiatisées, vu que cette liste des infrastructures critiques ne comportait aucun établissement inconnu ou non officiel, la spatialisation de ces implantations (figure 10) est une belle occasion d'observer l'organisation spatiale des dépendances vitales d'un territoire à l'échelle du Monde et nous démontre à quel point, dans un contexte de mondialisation et de systèmes d'interconnexions de plus en plus complexes, lointaines et multiformes des territoires, l'analyse de la vulnérabilité d'un lieu n'a de sens que si elle considère la vulnérabilité du système de lieux dans lequel il s'intègre et avec lesquels il entretient des relations de dépendances ou d'interdépendances.

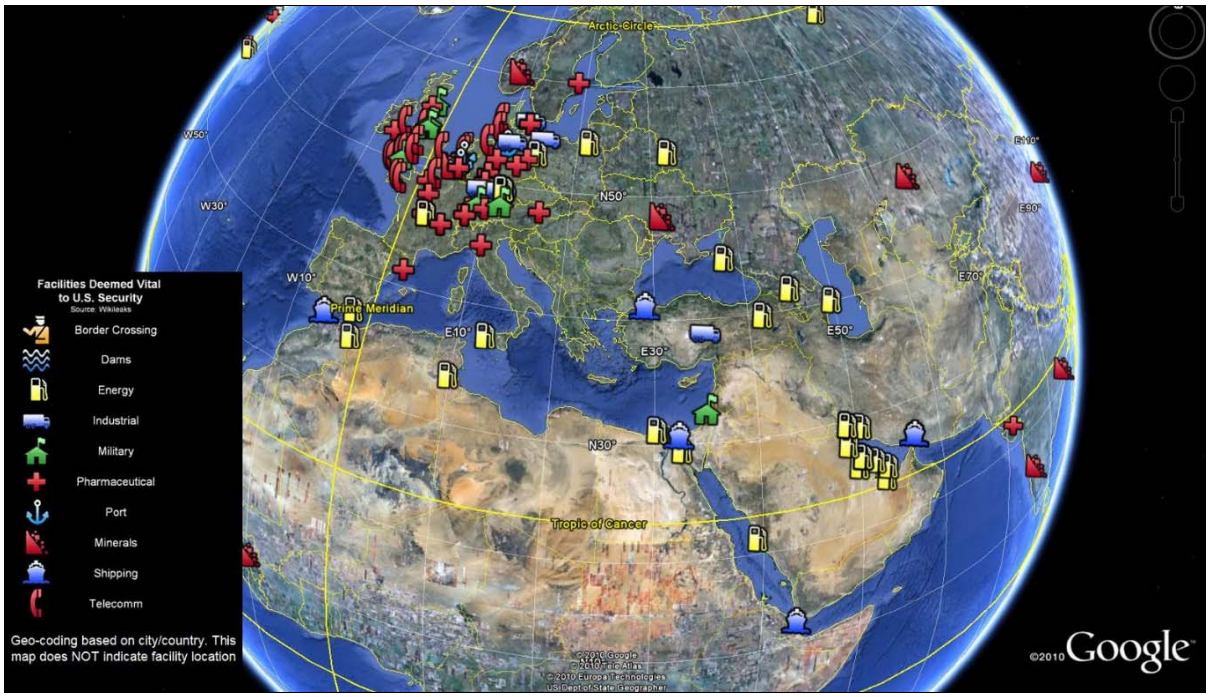


Figure 10 : Géo-référencement des infrastructures et des secteurs critiques de la liste diffusée par Wikileaks (Source : Anonyme).

Sans trop entrer dans les détails, parmi les infrastructures critiques, on retrouve des implantations aussi diverses que :

- les casernes militaires américaines implantées en Angleterre et en Allemagne depuis la fin de la seconde Guerre Mondiale.

- Des usines pharmaceutiques suisses ou françaises où sont fabriqués certains vaccins ou antipoisons, qu'on ne retrouve nulle part ailleurs.
- Des zones d'extraction de minerai.
- Les dépendances énergétiques essentiellement liées au pétrole avec une concentration notable dans le Golfe Persique.
- Les seuls réseaux techniques représentés, au sens strict, sont les nœuds des liaisons sous-marines de télécommunications internet qui traversent l'Atlantique, essentiellement à partir du Royaume Uni, et relient le réseau américain au réseau européen.

Ces éléments concordent donc avec ce que nous avons déjà souligné, les infrastructures critiques dépassent largement le cadre de la vulnérabilité des réseaux techniques et envisagent les infrastructures dans une perspective orientée vers des menaces à échelle nationale ou internationale, qui relève davantage d'une approche géopolitique que territoriale.

Par ailleurs, pour revenir à notre question de confidentialité et de sensibilité des informations, les réactions, suite à la publication des recherches de Wang et Rong dans la revue scientifique 'Safety Science' en 2009, sont un autre bon exemple des enjeux et des débats que peut susciter la large diffusion de résultats de recherches sur la fragilité des infrastructures critiques. L'article incriminé, intitulé « Cascade - Based Attack Vulnerability on the U.S. Power Grid » (Wang, Rong, 2009), avait en effet provoqué aux Etats Unis l'émoi de plusieurs politiques et experts en sécurité militaire, dont la réaction a été largement reprise dans les médias. Plusieurs propos insistaient sur le fait que même si le but de cette analyse était sans doute d'améliorer la sécurité du réseau, elle produisait une information potentiellement dangereuse si elle était exploitée avec des intentions malveillantes.

Pourtant, la démarche reprenait une logique de suppression progressive des nœuds appliquée au réseau électrique américain, comme il en existe dans de nombreux travaux déjà publiés par d'autres scientifiques partout dans le monde. De plus, comme l'ont souligné plusieurs autres chercheurs dans ce domaine, l'ensemble des données utilisées dans ce travail est issu de données publiques, aucun réseau n'est représenté, tout comme aucune stratégie d'attaque n'est précisément définie et localisée.

1.3.2. La vulnérabilité des réseaux dans un contexte de catastrophe naturelle

1.3.2.1. Cadre général

Même si le concept d'infrastructure critique est assez récent, variable selon les définitions et n'a intégré les menaces environnementales que récemment dans son champ d'application, l'importance des réseaux pour le fonctionnement des systèmes territoriaux, tout particulièrement dans le contexte spécifique des aléas naturels, fait l'objet de recherches depuis plusieurs dizaines d'années, notamment sous le concept de « lifeline » que nous pouvons traduire en français par réseaux vitaux (Kerjan, 2003 et Robert, 2002) : « Au même titre qu'un corps humain, une ville possède des réseaux vitaux. Dans le corps, ils assurent l'approvisionnement et le flux en énergie, information et en eau grâce aux systèmes alimentaire, vasculaire et neurologique. Dans la ville, ils assurent l'approvisionnement et le

flux de personnes, de biens, d'informations, d'énergie et d'eau au travers d'un système de transport, de communication, d'énergie et d'eau. Le dysfonctionnement ou l'endommagement important d'une fonction de ces lignes vitales, conduit à la blessure ou la mort dans le cas du corps humain et à la destruction ou au désastre dans la ville. » (Duke, 1972, cité par Shinozuka et al. 1998).

Une première distinction par rapport aux analyses de la partie 1.2 réside dans le fait que les recherches sur la vulnérabilité des réseaux en contexte de catastrophe ne sont généralement plus à l'échelle de la globalité du réseau mais le plus souvent à l'échelle de l'aléa naturel susceptible de déclencher le système de risques. La vulnérabilité des réseaux face aux aléas naturels nous amène à considérer des risques de type hybride puisqu'ils reposent sur l'interaction entre le système naturel et le système technique. Une autre particularité par rapport aux évènements dont nous avons parlé jusqu'à présent réside dans le fait que la perturbation d'origine « naturelle » interroge la réaction du système réseau quand plusieurs de ses composantes sont endommagées simultanément.

De plus, alors que nous avons jusqu'à présent considéré les perturbations de manière très générale, en distinguant des perturbations de natures faible / forte, unique / multiple, ponctuelle / zonale, les approches liées aux aléas climatiques ou géologiques prennent le plus souvent en compte le fait que la fragilité physique des équipements qui composent l'infrastructure, reste relative au type d'équipement et à la nature de la perturbation considérée. Par exemple, on comprend facilement qu'un réseau électrique souterrain est moins vulnérable à une tempête qu'un réseau aérien, et inversement pour une inondation ou un séisme.

Si la grande majorité de ces recherches est centrée essentiellement sur la dimension physique de l'infrastructure, une partie également s'inscrit dans une démarche pluridisciplinaire, ou du moins, une conception plus holistique de l'endommagement du réseau. Parmi les quelques recherches qui tendent vers cette conception plus ouverte, nous avons choisi d'en présenter deux qui ont fortement influencé le développement de notre propre démarche.

La première porte sur la vulnérabilité sismique des réseaux électriques avec des démarches appliquées à la région de Memphis dans le Tennessee (Shinozuka, Rose, Eguchi et al., 1998) puis à l'agglomération de Los Angeles en Californie (Shinozuka, Chang, Cheng, 2003, Shinozuka et al. 2007). Ces analyses s'inscrivent dans une démarche « ouverte » croisant ingénierie et approche socioéconomique des impacts des séismes, et sont menées dans le cadre du MCEER (Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research) depuis le milieu des années 1990. L'impact sociétal est principalement appréhendé dans sa dimension économique à court et moyen terme, afin de mieux évaluer le coût global de ces évènements (Rose, 1998, 2006). Cette information est évidemment déterminante afin d'évaluer l'investissement et le niveau « rentable » de protection des infrastructures pour limiter ces évènements.
La seconde traite de la vulnérabilité des réseaux routiers aux inondations, et du risque de thrombose urbaine dans la ville de Nice, et s'appuie sur l'utilisation d'un « système d'information géographique à des fins géoprospectives » (Voiron, Oliver, 2003). Si les enjeux

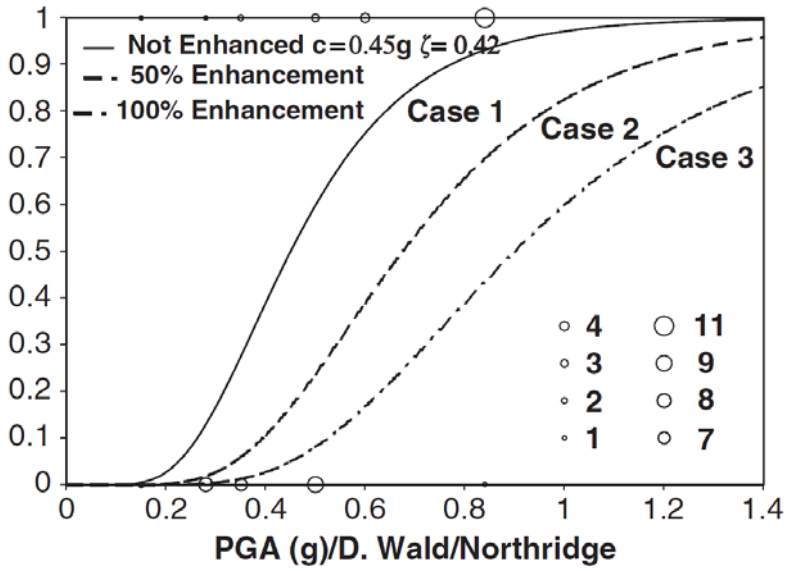
économiques sont au cœur des recherches présentées dans le paragraphe précédent, cette démarche est davantage orientée vers la protection des populations vulnérables (Voiron, Olivier, 2005) et les enjeux sanitaires liés aux déficits d'accessibilité des territoires en période d'inondation (Voiron, Olivier, Domergue et al, 2005).
Ces deux recherches qui semblent sans rapport, tant elles portent sur des territoires, des aléas naturels, des réseaux, des finalités et des méthodes différentes, relèvent pourtant, toutes deux, d'une approche complexe du risque où la composante réseau est à la fois impactée et impactant.

1.3.2.2. L'exemple de la vulnérabilité sismique des réseaux électriques dans les agglomérations américaines de Memphis et de Los Angeles

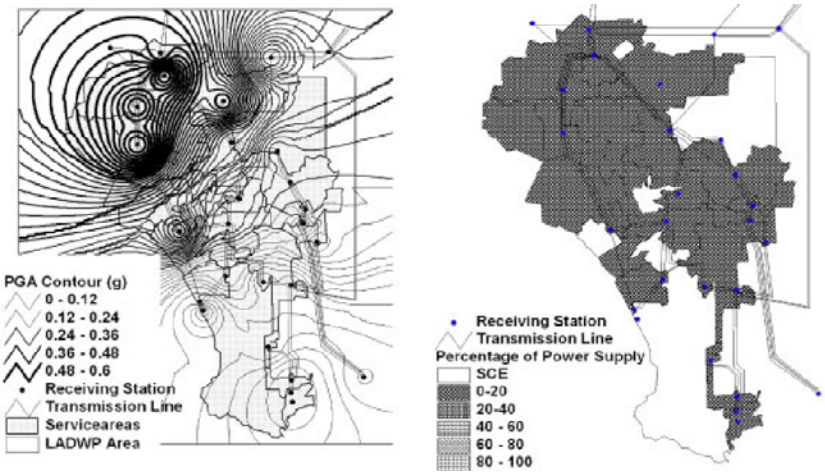
Les courbes de fragilité, une approche probabiliste de l'impact direct

Les approches de type ingénierie des risques (et des réseaux) représentent assez logiquement une part importante des travaux sur la thématique de la fragilité physique des infrastructures. On retrouve dans ce cadre, de très diverses applications allant des expériences « crash-test » en laboratoire pour tester la résistance des postes électriques à une secousse sismique, à la modélisation probabiliste des niveaux d'endommagement des infrastructures pour un aléa d'une intensité variable. Ces derniers modèles ont recours le plus souvent à ce que l'on appelle des courbes de dommages qui associent une probabilité d'endommagement pour une composante du réseau et une variable liée à l'intensité physique de la perturbation d'origine naturelle, par exemple, la hauteur d'eau ou la turbidité pour une inondation, la force du vent pour le risque associé aux tempêtes ou le pic d'accélération locale pour un séisme (PGA).

Les courbes de fragilité présentées en figure 11 sont construites à partir des données d'endommagement des transformateurs de poste d'électricité haute tension, observées lors du séisme de magnitude 6.7 à Northridge en 1994 (Shinozuka, 1998). Ces données empiriques apparaissent en forme de cercle sur les axes en abscisses de la courbe. Les cercles sur l'axe supérieur (probabilité de défaillance = 1) indiquent le nombre de transformateurs des postes électriques endommagés, ventilé en fonction de la force de destruction qui découlait de l'aléa sismique (mesuré en fonction du pic d'accélération locale PGA en g) ; sur l'axe inférieur figure le nombre de transformateurs intacts également ventilé de la même manière. Par exemple, sur l'ensemble des postes du réseau, les 11 transformateurs exposés à un PGA légèrement supérieur à 0.8g ont été détruits lors du séisme, 4 ont été détruits en étant exposés à un PGA de 0.5g alors que 8 ont résisté.



(a)



(b) (c)

Figure 11 (a) : Courbes de fragilités associant une probabilité d'endommagement des réseaux électriques liée à l'intensité sismique exprimée en fonction du pic d'accélération (PGA) à partir des données du séisme de Northridge de 1994 ; (b): simulation des pics d'accélérations sismiques ; (c) simulation des effets induits en termes d'approvisionnement électrique (Source : Shinozuka et al., 1998).

A partir de ces données empiriques sur la distribution ventilée des dommages en fonction des PGA, la courbe de fragilité pour le séisme de Northridge est déduite à partir d'une fonction log-normale dans laquelle on considère :

$$\Phi[(1/\zeta)\ln(a/c)]$$

Avec a = PGA, c = médiane des valeurs de PGA and ζ *= log standard déviation des PGA*

Les cas 2 et 3 des courbes de fragilité (figure 11) représentent une transformation de la courbe initiale obtenue simplement en amplifiant la valeur de la médiane des valeurs de PGA (c) de la courbe de 50% dans le cas 2 et de 100% dans le cas 3. Ainsi dans le cas 1, pour

qu'une composante ait 50 % de chance d'être endommagée, une valeur de PGA de 0,45g est nécessaire, alors que dans le cas 2, la valeur de PGA nécessaire est de 0.67g, enfin dans le cas 3, une valeur de 0.90g. Ces transformations correspondent donc à une amélioration de la sécurité des infrastructures, les composantes sont plus résistantes aux coupures que dans le scénario observé empiriquement.

Même si le scénario n'est pas envisagé, il serait également mathématiquement possible de procéder à la démarche inverse si l'on applique par exemple les courbes de fragilité à des équipements électriques dont on identifie au préalable un état de dégradation ou de vieillissement particulièrement important ; un scénario de dégradation de 50% de la résistance des équipements consisterait alors à centrer la valeur médiane des PGA sur 0,22g.

Les courbes de fragilité, résultant de l'analyse des corrélations spatiales entre les dommages observés et la variabilité spatiale de l'aléa, permettent de transformer une information empirique sur les dommages des séismes en connaissance probabiliste sur la résistance physique des infrastructures. A partir de différents scénarios de simulations de séismes probables et de ces courbes de fragilité, il est alors possible de simuler, à partir de tirages de Monte Carlo, des scénarios de dommages directs sur le réseau électrique. Dans la démarche présentée dans (figure 11) (Shinozuka et al., 2007), 50 scénarios de propagations de séismes sont simulés ; chacun des 50 scénarios donne lieu à 20 simulations aléatoires des endommagements physiques du réseau à partir des courbes de fragilité (pour trois types de composantes du poste électrique : transformateurs, coupe circuit et aiguilleur, qui disposent chacune de leurs propres courbes de fragilité). Du fait du cumul de l'incertitude sur la perturbation sismique et de celle sur les impacts directs, 1000 scénarios d'endommagements possibles des réseaux électriques par les séismes sont produits.

Les impacts directs et indirects sur les activités économiques

Ces scénarios d'endommagements sont des points possibles de déclenchements des défaillances en cascades et se situent en amont du système de risques. Il s'agit ensuite de simuler les perturbations des dynamiques de flux électriques que génère la suppression d'une ou plusieurs composantes du réseau électrique. Ces simulations sont réalisées à partir d'un logiciel spécifique aux réseaux électriques développé par EPRI (Electrical Power Research Institute) dont le fonctionnement consiste à chercher par itération, un nouvel équilibre entre offre – demande électrique, en délestant la puissance fournie à différents nœuds. Pour chacun des postes du réseau électrique, on est alors en mesure de donner la quantité d'énergie non fournie et la quantité de foyers coupés pour un scénario donné d'impacts directs. Nous reviendrons sur la délimitation des zones de dessertes du réseau électrique dans la partie 2.

A partir de ces informations sur la quantité d'énergie non fournie, (Rose et al., 1997) tiennent compte de la dépendance différenciée à l'électricité selon les secteurs d'activités économiques, des interdépendances entre les secteurs d'activités (à partir d'une matrice d'entrée-sortie des transactions financières entre les 21 secteurs d'activités de la zone) et de la différenciation de la coupure dans l'espace et dans le temps, pour évaluer plus finement le niveau de dysfonctionnement des activités économiques et le coût réel des dommages

indirects de la coupure électrique. Le coût global est estimé en termes de réduction du produit régional brut (disponible également par secteur d'activités économiques), et témoigne de l'importance des dommages indirects (le fait qu'une entreprise n'ait pas d'électricité pénalise sa capacité à produire), et induits (le fait qu'une entreprise ne puisse pas produire pénalise la production d'une autre entreprise) de la coupure électrique. Le temps de restauration (et donc la durée de la panne) intervient bien sûr fortement dans l'estimation de ces coûts ; dans le cas du séisme de Northridge par exemple, certaines zones sont restées privées d'électricité jusqu'à 15 semaines après l'impact initial.

Sans détailler la méthode employée, on retiendra pour l'instant qu'elle peut être modélisée à partir de deux règles simples (Chang, 1997) :

- La restauration débute par les zones de moindres dommages pour terminer par les zones de plus grands dommages.
- La restauration procède de manière non linéaire dans le temps, une grande partie des clients est rapidement restaurée, et une minorité ne le sera que bien plus tardivement.

1.3.2.3. La vulnérabilité du réseau routier aux inondations et le risque de thrombose urbaine dans la ville de Nice

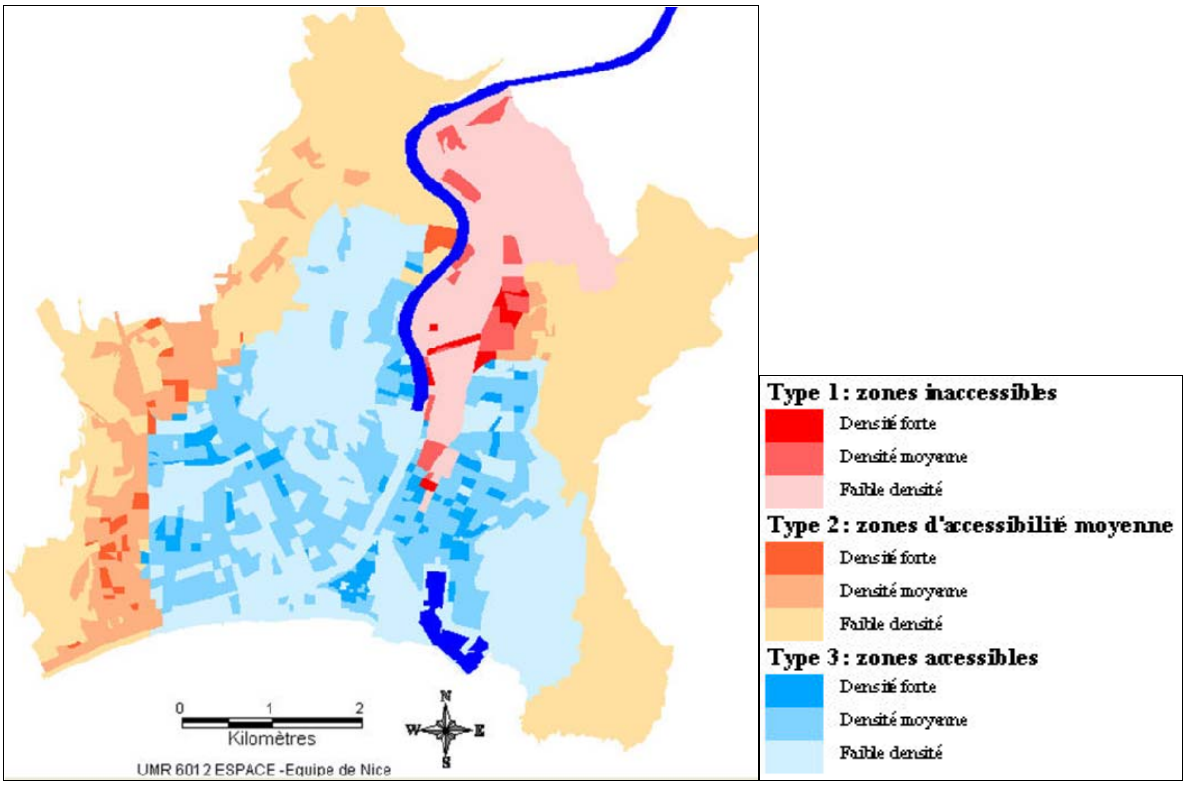
Malgré des différences thématiques, géographiques et méthodologiques, les deux approches présentées dans le cadre de l'état des recherches sur les risques naturels et la vulnérabilité des réseaux ont en commun le souci de travailler à la fois sur l'impact direct au réseau, la diffusion du dommage initial par le réseau et l'impact de ces dysfonctionnements réticulaires sur le fonctionnement des territoires. Dans le cas précédent, les impacts sociétaux associés aux dysfonctionnements des réseaux sont appréhendés dans une optique d'estimation des pertes économiques à court et moyen terme. Dans le cas présent, l'étude est davantage menée dans une perspective de gestion de crise et de protection des personnes vulnérables.

Le déclenchement du système de risques est cette fois lié à une inondation, et situe explicitement l'Espace et le réseau routier au cœur de la modélisation du risque. La démarche repose sur une distinction fondamentale entre espaces à enjeux statiques et espaces à enjeux dynamiques. Ces espaces ponctuels à enjeux statiques relèvent de trois catégories :

- les espaces publics qui concentrent une masse importante de population (centres commerciaux, culturels, sportifs),
- les espaces qui concentrent beaucoup de populations vulnérables (crèches, hôpitaux, écoles, maisons de retraite),
- les espaces ayant un rôle essentiel dans la gestion des situations de crises (centres de police, casernes de pompiers, relais électrique ou de télécommunication, hôpitaux).

Ces derniers espaces ne sont pas plus fragiles ou plus exposés au risque que les autres espaces par contre ce sont des espaces à enjeux, car leur destruction augmenterait l'impact d'un aléa en réduisant la capacité de sécurisation des espaces. On peut dire que globalement, les espaces vulnérables à enjeux statiques sont relativement simples à identifier et que les critères utilisés pour les définir peuvent changer selon la problématique et le risque considéré.

En revanche, pour anticiper les espaces vulnérables à enjeux dynamiques, une simulation du système urbain en état de crise (post aléa) doit être mise en œuvre. En effet, les espaces à enjeux dynamiques doivent, en quelque sorte, être révélés par une perturbation qui va désordonner le système territorial. Dans le cas suivant (carte 2) (Voiron, Olivier, 2005), il s'agit de simuler les conditions d'accessibilité des territoires de l'agglomération niçoise en période d'inondation, afin d'identifier des espaces à enjeux dynamiques (zones inaccessibles en situation d'inondation), qui peuvent également correspondre à des espaces à enjeux statiques (par exemple, un hôpital ou une maison de retraite peut devenir inaccessible en situation d'inondation). La méthode permet donc d'identifier des espaces à enjeux dans les systèmes de risques qui peuvent, sans être directement intégrés dans le premier périmètre de l'aléa, faire pourtant pleinement partie du système de risque.



Carte 2 : Densité démographique et niveau d'accessibilité en période d'inondation du Paillon dans la commune de Nice (Source : Voiron, Olivier, 2005).

1.3.3. Les interdépendances des réseaux comme générateurs d'effets de cascades

1.3.3.1. De la vulnérabilité du réseau à la vulnérabilité des réseaux, une approche plus compliquée ou plus complexe ?

Par rapport à une approche centrée sur la fragilité d'un seul réseau, la volonté de prendre en compte différents types de réseaux techniques (électricité, eau et route par exemple) dans une analyse du risque peut s'envisager de deux manières différentes. On peut

d'abord examiner distinctement la fragilité de chaque réseau, la démarche consiste alors à rassembler les courbes de fragilité propres à chaque type de réseau technique, courbes pouvant elles-mêmes être déclinées en fonction de différents types d'aléa naturel susceptibles d'impacter le réseau étudié. La difficulté introduite par la dimension multi-risque et multi-réseau est alors essentiellement d'ordre quantitatif, on ajoute des composantes, on multiplie les traitements. La démarche repose sur une logique de cumul des impacts et peut être qualifiée de plus compliquée par rapport à une approche de la fragilité sur un seul réseau.

D'un autre point de vue, on peut penser que compte tenu des interdépendances des réseaux techniques de différentes natures, il existe bien une globalité du réseau technique ; on ne peut alors plus concevoir la fragilité des réseaux distinctement, mais bien la fragilité d'un seul et même système technique, hétérogène, disparate, organisé à partir de logiques, de structures et de flux différents, mais formant tout de même un système. La vulnérabilité des réseaux pose alors le problème des interdépendances entre les différents types de réseaux. La difficulté introduite par la dimension multirisque et multi-réseau devient cette fois d'ordre qualitatif et porte sur la nature des liens entre les composantes. La démarche repose alors sur une logique de systèmes de risques, d'interactions entre les impacts plutôt que de cumuls, et peut être qualifiée de plus complexe par rapport à une approche de la fragilité sur un seul réseau.

L'enjeu de la vulnérabilité des réseaux n'est donc pas seulement de dissocier les infrastructures et les composantes critiques de celles qui ne le sont pas, mais aussi de comprendre les relations de dépendance qui peuvent exister entre plusieurs types d'infrastructures. Du fait de cette interdépendance des réseaux hétérogènes, on admet que l'endommagement d'un réseau peut constituer une perturbation initiale pour les autres réseaux, suffisante pour générer des défaillances en cascade dans l'ensemble du système technique (puis plus largement dans le système territorial). Il y a donc parmi les propriétés des systèmes techniques, une capacité qui s'avère assez proche de l'autodestruction, dans la mesure où le système peut à lui seul et sans intervention exogène, générer une perturbation et la diffuser à l'ensemble du système. Les interdépendances des réseaux peuvent dès lors constituer la toile de fond de scénarios potentiels de défaillances en cascades, une sorte de générateur de scénarios complexes catastrophiques.

1.3.3.2. L'interdépendance des réseaux, définition

Une interdépendance peut se définir comme « une relation bidirectionnelle établie entre deux infrastructures de telle sorte que l'état de chaque infrastructure est influencé ou corrélé à l'état de l'autre infrastructure » (Rinaldi, 2004). Cette définition assez classique reprend la notion fondamentale d'interdépendance de la théorie systémique en la transposant simplement aux infrastructures en réseaux. Plusieurs typologies des dépendances entre les réseaux sont envisageables. Certains chercheurs (Rinaldi, Peerenboum, Kelly, 2001) proposent une première typologie de 4 classes d'interdépendances des réseaux; cette typologie sera ensuite développée dans les travaux de (Perderson et al., 2006) pour qui :

- L'interdépendance peut être « physique» lorsqu'il existe un équipement qui fait liaison ou une connexion matérielle entre deux infrastructures.
- L'interdépendance informationnelle intervient dans les systèmes dont l'état des composantes dépend d'informations ou de mécanismes de contrôles transmis à travers un système informatique en réseau. On peut considérer que ce type d'interdépendance informationnelle est lié au fait qu'il existe une dépendance de chaque réseau technique à son « info réseau » (Curien, Dupuy, 1996).
- L'interdépendance est qualifiée de « géospatiale » lorsque la proximité, voire la co-localisation de deux composantes dans l'espace fait qu'un évènement externe local aurait un impact direct sur les deux composantes. Par exemple, il existe une forte concordance entre le tracé souterrain des réseaux d'eau, d'électricité ou encore de gaz dans les plans de développement des réseaux techniques urbains.
- L'interdépendance politique (ou de gouvernance) qualifie les liens qui unissent les composantes dépendantes d'un même système de contrôle et de gestion, et donc soumises à des procédures identiques.
- L'interdépendance sociétale qualifie l'impact potentiel d'une défaillance d'un réseau technique sur des facteurs sociétaux comme l'opinion publique, la peur, le bien être ou la confiance dans les systèmes techniques.

Pour un géographe, la définition de l'interdépendance géographique ou géo-spatiale qu'on retrouve dans les recherches sur la vulnérabilité des infrastructures critiques apparaît assez restrictive puisqu'elle se limite en fait à la notion de proximité spatiale et de co-localisation entre deux tracés de réseaux. Cette définition est assez peu comparable avec les concepts d'interactions ou d'interdépendances spatiales tels qu'ils sont habituellement entendus en géographie, notamment, pour prendre une définition particulièrement étendue : « l'interaction spatiale est l'ensemble des processus par lesquels ce qui passe en un lieu peut retentir sur l'évolution d'autres lieux. » (Pumain D., Saint Julien T., 2001). Par exemple, si l'on considère, l'interdépendance dite physique, qui repose sur une connexion matérielle, un point de liaison entre deux réseaux de nature différente (un poste électrique qui alimente une station de pompage d'eau potable), il y a bien une spatialité de cette interdépendance, c'est un point, localisé dans l'espace susceptible d'agir sur une portion d'espace plus étendue. Nous reviendrons sur la place de l'Espace dans l'analyse des risques liés aux interdépendances des réseaux dans le chapitre 2.

1.3.3.3. La rareté des analyses empiriques sur ces effets dominos

Pour prendre un exemple simple des interdépendances des réseaux techniques, la figure 12, issue d'un retour d'expérience du CERTU, présente une séquence d'évènements observée pendant les inondations de Lyon et de Macon en 2001. En termes d'infrastructures, cette séquence d'évènements correspond à une interdépendance physique entre le système électrique (nœud ou ligne) et le réseau de traitement des eaux usées (en l'occurrence un nœud), et permet le passage d'un évènement impactant le système technique vers un impact au système naturel. Ici, le fait que la coupure électrique soit déclenchée en amont par une inondation importe assez peu et n'apparaît pas sur la figure ; la chaîne de dommages est

d'ailleurs reproductible même si en amont la coupure électrique venait à être déclenchée par une perturbation d'origine différente.

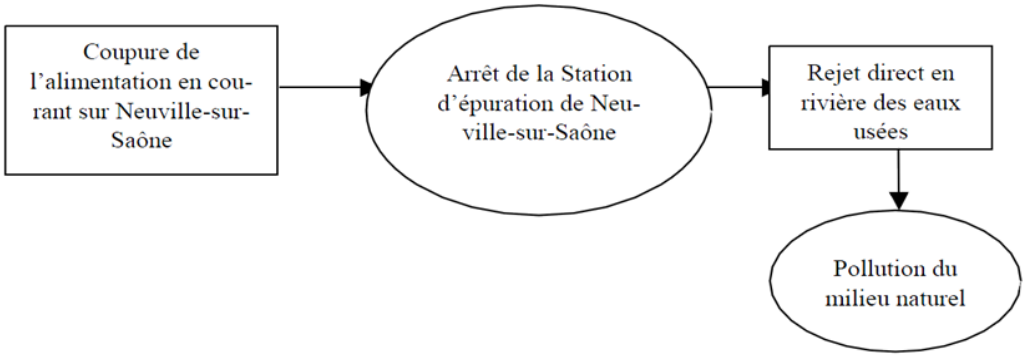


Figure 12 : Effets en chaîne consécutifs à l'arrêt de la station d'épuration de Neuville-sur-Saône (Source : CERTU, 2001).

Il existe assez peu de travaux empiriques sur les défaillances en cascades observées dans les réseaux techniques, tant dans la littérature scientifique que dans les retours d'expériences menés par les gestionnaires des différents réseaux, après les crises. Dans les retours d'expériences sur les coupures électriques à petite échelle, on trouve généralement une information détaillée sur le déroulement technique de la panne et la gestion de crise, mais assez peu d'informations sur les dommages engendrés par la panne électrique sur d'autres réseaux techniques et plus largement sur la société.

Dans les retours d'expérience sur les catastrophes naturelles, les dommages aux réseaux sont certes de plus en plus abordés, et les gestionnaires de ces réseaux techniques de plus en plus systématiquement intégrés dans le processus de gestion de crise et dans la réalisation des retours d'expériences. Néanmoins, les réseaux sont traités de manière très distinctive, chaque gestionnaire traite des effets de l'inondation, de la tempête ou du séisme sur son propre réseau ; on additionne ses effets pour en déterminer l'effet global de l'aléa sur les réseaux. En témoigne l'organisation de la partie Réseau de ces rapports, cloisonnée le plus souvent en sous-parties étanches par type de réseau. On retrouve en fait assez souvent la logique d'accumulation des informations dont nous parlions en 3.1.

Dans une analyse sur la vulnérabilité des infrastructures critiques interdépendantes, Zimmerman note d'ailleurs que si « on trouve de nombreux travaux théoriques qui conceptualisent les caractéristiques des interdépendances et de leurs impacts. Les travaux empiriques sont nettement moins fréquents » (Zimmerman, 2004). Ainsi, à partir d'une analyse menée sur plus de 100 évènements accidentels survenus aux Etats Unis entre 1990 et 2004 (la base de données n'intègre pas de dommages initiés par des catastrophes naturelles), ce dernier mesure pour chaque type de réseau un ratio entre le nombre de fois où le réseau est affecté par une panne d'un autre réseau, et le nombre de fois où le réseau a affecté un autre réseau (tableau 2). Par exemple, le réseau électrique qui a été impacté à 14 reprises par une panne d'un autre réseau, et a impacté lui-même un autre réseau 12 reprises, possède un ratio de 0.9.

Sans remettre en question son intérêt, en particulier pour comprendre la direction globale des cascades de défaillances entre les réseaux, cet indicateur synthétique est à manipuler avec précaution dans la mesure où des compensations entre les résultats des réseaux peuvent masquer de fortes interdépendances. Les informations désagrégées sur les interdépendances font ressortir d'autres éléments et notamment le fait que parmi les cascades aux effets dominos les plus fréquents, apparaissent d'abord les relations entre les réseaux routiers et les réseaux de gaz, puis celles entre les réseaux électriques et les réseaux d'eau potable.

1 Type of Infrastructure	2 # of Times Infrastructure (Column 1) Caused Failure of Other Infrastructure	3 # of Times Infrastructure (Column 1) was Affected by Other Infrastructure Failures	4 Ratio of Causing vs. Affected by Failure (Col. 2 divided by Col.3)
Water mains	34	10	3.4
Roads	25	18	1.4
Gas lines	19	36	0.5
Electric Lines	12	14	0.9
Cyber/ Fiber Optic/ Telephone	8	15	0.5
Sewers/ sewage treatment	8	6	1.3

Tableau 2 : Ratio entre la fréquence où un réseau est impacté et celle où un réseau est impactant d'après les observations de dommages accidentels aux Etats Unis entre 1990 et 2004 (Source : Zimmerman, 2004).

Si ce type d'analyse synthétique représente bien une tendance générale et le fonctionnement d'évènements « simples » reposant sur un seul chaînage d'impacts d'un réseau à un autre, il serait prématuré de vouloir directement en dégager des tendances probabilistes sur la diffusion des défaillances d'un réseau à un autre, lors d'évènements complexes et de grande ampleur (ce n'est d'ailleurs pas la vocation que son auteur attribue à son analyse). Pour expliquer cette limite, reprenons un exemple cité dans l'article, la coupure électrique du 14 août 2003 qui avait duré 72 heures et touché 50 millions d'habitants ; cet évènement est intégré dans la base de données comme au moins 4 relations de réseau à réseau :

- Réseau cyber → Réseau électrique
- Réseau électrique → Réseau eau potable
- Réseau électrique → Réseau éclairage routier
- Réseau électrique → Réseau ferré

Imaginons que la panne électrique ait provoqué des problèmes d'alimentation sur le réseau ferré uniquement dans une petite ville, mais qu'elle ait par contre causé des problèmes dans presque tous les réseaux de distribution d'eau potable de la zone touchée par la coupure (qui représentent plusieurs sous-systèmes indépendants les uns les autres). Cela signifierait donc que l'évènement du 14 août 2003 montre qu'il y a davantage de possibilités qu'une panne du réseau de transport électrique impacte le réseau en eau que le réseau ferré ; or en termes de recensement d'apparition de l'effet de cascade (tableau 2), les deux interdépendances comptent strictement de la même manière.

1.3.3.4. Des interdépendances et des effets dominos multi-niveaux

En passant d'une logique d'intra et d'interdépendance du réseau à une logique de diffusion des effets dominos, plusieurs types d'effets dominos sont envisageables. Pour illustrer cette idée, considérons pour le moment un cas simple à partir de deux réseaux, le réseau électrique et le réseau d'eau potable d'une commune par exemple.

Les diffusions horizontales sont celles qui se déroulent à l'échelle d'un réseau, par exemple la trajectoire des évènements 1 et 2 (TRJ 1 et 2 de la figure 13) qui ne concernent respectivement que le réseau électrique et le réseau d'eau potable. Le cas plus complexe de la trajectoire 3 porte sur le réseau de distribution électrique et le réseau d'eau potable, elle correspond par exemple à un scénario de coupure électrique sur le réseau de distribution locale provoquant une rupture d'approvisionnement dans une station de pompage d'eau, qui induit ensuite une coupure d'eau potable. Le scénario est donc plus complexe et on peut considérer qu'il y a un effet domino d'ordre horizontal propre à chacun des réseaux, mais également un effet domino d'ordre vertical où l'impact passe d'un type de réseau à un autre.

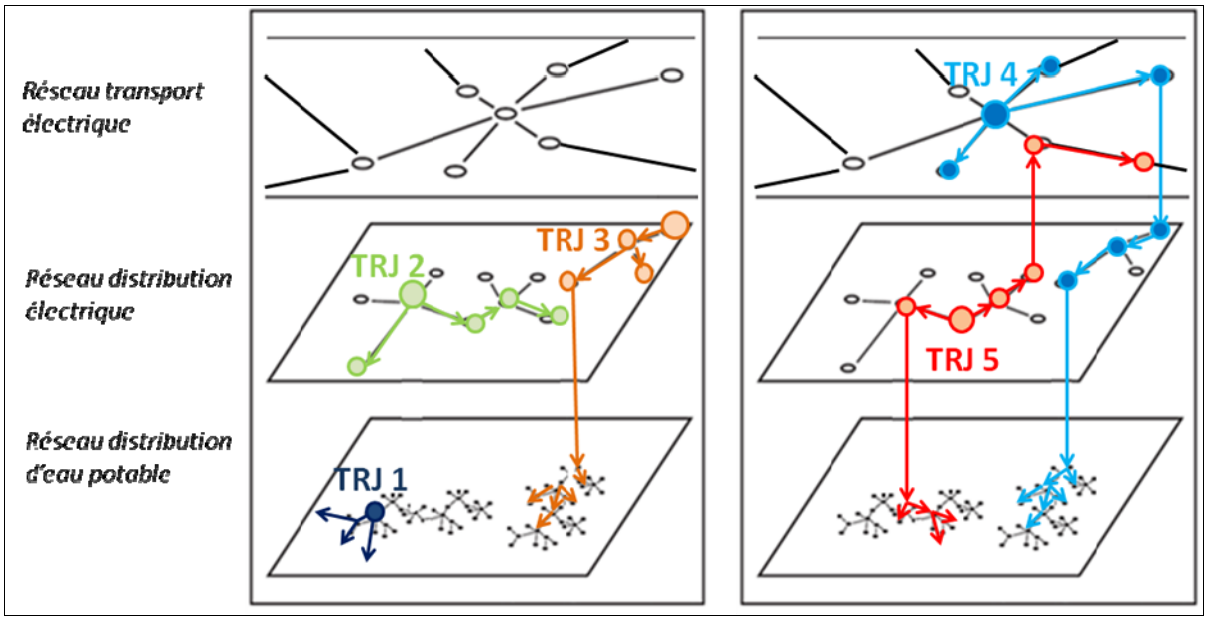


Figure 13 : Imbrications des réseaux, interdépendances verticales et trajectoires des systèmes de risques (inspiré de la réprésentation de Hagerstrand, 1953, dans Daudé, 2002).

Le cas 4 est plus complexe, il correspond à un cas d'effet domino avec un changement de structure comme dans le cas 3, mais cette fois-ci, il fait intervenir plusieurs échelles d'organisation des réseaux, et pas seulement plusieurs niveaux d'organisation. Ce type d'effet domino a par exemple été observé lors de la coupure électrique du 14 août 2003 au cours de laquelle plusieurs états américains avaient été touchés (plus de 50 millions de personnes coupées pendant parfois plus de 24 heures), mais où certaines zones d'agglomération comme Détroit (4 millions de personnes impactées) ainsi que Cleveland et New York (Groupe de travail Canada-Etats Unis, 2003), n'avaient pas d'eau potable plus d'une semaine après l'évènement (une forme d'impact indirect dû à la perte de pression dans les stations de distribution d'eau pendant la coupure).

Un aspect également à noter sur cet évènement concerne le fait que, même si la coupure électrique locale est provoquée par une panne située à un niveau d'organisation supérieur, elle ne provoque pas pour autant la coupure de l'ensemble du réseau local, ainsi on peut en déduire qu'un déclenchement d'effets dominos en amont n'annule pas nécessairement la différenciation spatiale produite par le réseau en aval. Les différenciations spatiales s'imbriquent et produisent un système de risques dont la différenciation spatiale imbrique plusieurs logiques spatiales et plusieurs échelles de structuration. Dans certaines villes dont New York, lors de la coupure de courant d'août 2003, certains îlots étaient toujours approvisionnés au milieu de centaines d'îlots non approvisionnés. L'écroulement du réseau n'était donc pas total, et pouvait permettre aux gestionnaires de maintenir le courant à certaines zones ciblées.

Dans le cas 4 comme dans le 5, l'effet domino permet une sorte de bond scalaire, c'est-à-dire qu'une composante à l'interface de deux échelles des réseaux va dysfonctionner et permettre au réseau de passer à une autre échelle d'un réseau. Ce bond scalaire peut être descendant, on parle d'effet de cascade, comme dans le cas 4, mais il peut également être ascendant comme dans le cas 5, on parlera alors d'effet d'escalade. La dimension hiérarchique du réseau électrique (réseau de transport/réseau de distribution) implique à elle seule l'imbrication de plusieurs structures spatiales différenciées. En se combinant avec des réseaux d'autres natures, les niveaux scalaires du système technique sont donc imbriqués, le plus souvent de manière moins concordante qu'à la seule échelle du réseau électrique, par exemple le réseau d'eau potable peut fonctionner à l'échelle d'un bassin versant intercommunal, alors que la distribution électrique fonctionnera à l'échelle d'une aire urbaine, tout en étant solidaire d'un réseau de transport électrique régional.

Dans l'ensemble de ces méthodes, l'approche du risque dans les systèmes techniques est essentiellement orientée vers l'infrastructure et les « grands équipements » du système technique. Il nous paraît important de préciser que ces interdépendances opèrent également à tous les niveaux du système technique et même au niveau de l'habitat domestique.

Si l'on prend l'exemple de la dépendance du réseau de téléphonie fixe à l'égard du réseau électrique (figure 14), celle-ci opère d'abord au niveau de l'infrastructure à petite échelle puisque certains équipements du réseau de télécommunication ont besoin d'électricité pour fonctionner. Mais elles opèrent également au niveau de l'usager et de l'équipement de l'habitat, puisque la plupart des téléphones « domiciles » actuels sont sans fils et branchés à la

fois au niveau de la prise téléphonique et de la prise électrique pour fonctionner correctement. De plus, le développement des offres commerciales tout compris internet-téléphonie-tv, poussent les foyers à s'équiper de « box » qui centralisent l'ensemble des services de télécommunications et même de télévision. Ces boîtes fonctionnent à l'électricité : sans électricité, pas de box, pas de box, pas de télécommunication, et ce, même si au niveau de l'ensemble de l'infrastructure, le réseau de télécommunication fonctionne parfaitement. Désormais, l'électronique, l'automatisation généralisée dans les équipements de nos habitats (et le confort de la domotique) et plus largement de nos milieux de vie, pour les environnements urbains en particulier, induit un niveau de dépendance à l'électrique quasi généralisé.

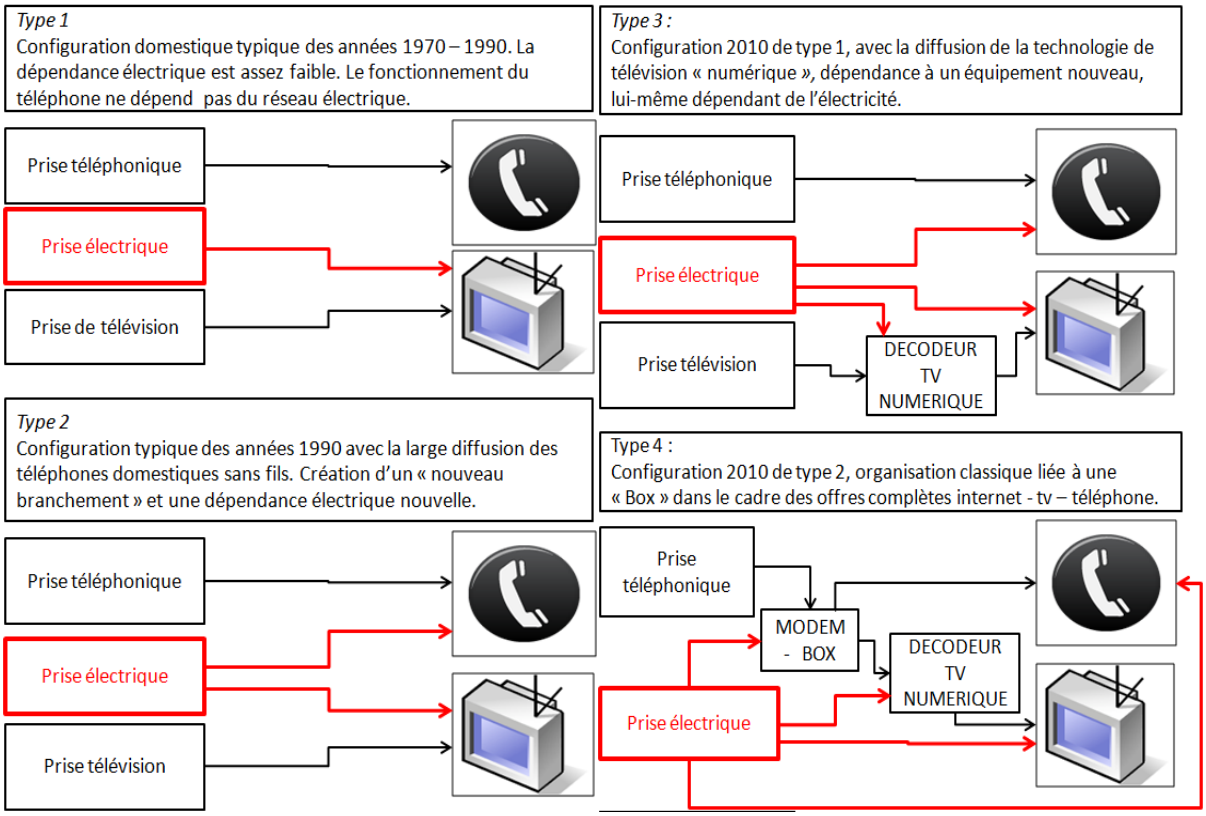


Figure 14 : Complexification des interdépendances du réseau domestique et aggravation, entre 1970 et 2010, de la dépendance électrique des services téléphoniques et télévisuels.

Conclusion

Dans ce premier chapitre, l'état des recherches autour des questions de réseaux a mis en avant plusieurs caractéristiques des coupures électriques et, plus largement, du comportement dynamique des systèmes complexes. Pour les coupures électriques, les évènements caractérisés par des effets de cascades semblent atteindre des dimensions, en termes de quantité d'énergie non desservie et de fréquence, qui dépassent assez nettement, dans le cas du réseau américain, ce que laissent présager les prolongements de tendance sur la base de courbe exponentielle, à partir des données sur la distribution temporelle des coupures

électriques de plus petites dimensions. Les lois de puissance observées dans la distribution des évènements de grande taille conduisent alors plusieurs auteurs à envisager le réseau électrique comme un système auto-organisé critique (Carreras, al., 2001, 2004).

Parallèlement à cette formalisation issue de la connaissance du comportement dynamique du système électrique, nous avons pu voir également que certaines de ces propriétés dynamiques pouvaient être rapprochées des propriétés structurelles de réseaux théoriques comme les réseaux scale free (Barabasi, Albert, 1999, Barabasi, al. 2003) ou de la propriété RYF pour Robust Yet Fragil, observé dans le cas du réseau internet (Doyle, 2005). De nouveau, les recherches sont orientées vers la détection de lois de puissances qui cette fois, ne portent plus sur la distribution temporelle des grandes pannes, mais sur l'organisation structurelle du réseau et la distribution de la connexité des nœuds du réseau. Dans le cas du réseau électrique américain (Hines, 2010), comme dans celui du réseau électrique européen (Rosas, 2009), les tests laissent toutefois penser que d'un point de vue statistique, le réseau électrique ne répond pas aux caractéristiques topologiques des réseaux scale free.

Pour autant, les réflexions sur les propriétés théoriques et les conditions d'émergence des structures hétérogènes et hiérarchiques décrites au premier chapitre n'en demeurent pas moins d'un grand intérêt pour notre approche. En particulier, elles mettent en avant le fait que la croissance de certains réseaux pourrait s'orienter « par nature » et recherche d'optimalité vers une structure de plus en plus hiérarchique et différenciée contribuant à améliorer son efficacité, sa résistance et sa résilience face à des perturbations aléatoires même d'intensité importante. Toutefois en parallèle, la différenciation des composantes du réseau, liée au principe d'attachement préférentiel, induit une dépendance différenciée du système vis-à-vis de ses différentes composantes, qui se manifeste par une forme d'hypersensibilité à certaines perturbations mineures mais localisées stratégiquement.

La détection d'espaces à enjeux dans les systèmes de risques implique alors de développer une connaissance qui ne porte pas sur l'interaction du système territorial avec une perturbation externe mais sur les interdépendances du système espace-réseau-population. Au-delà de ces dimensions temporelles et structurelles du réseau technique, les systèmes de risques associés aux coupures électriques posent donc la question des interdépendances réseaux et territoires sur de nombreux plans (interdépendance des réseaux techniques, interdépendance spatiale induite par l'organisation des réseaux, dépendance de l'organisation des réseaux vis-à-vis de l'organisation spatiale des ressources et de la répartition des bassins de consommation, et dépendance sociétale et du fonctionnement territorial au bon fonctionnement des réseaux lumières). Pour appréhender cette complexité, les fondements principaux d'une approche spatiale et géographique des systèmes de risques seront présentés au chapitre 2. A partir de ces fondements, le chapitre 2 permettra ensuite d'expliciter plus clairement notre problématique et notre démarche de recherche ainsi que les principales hypothèses qui la sous-tendent.

CHAPITRE 2 : UNE APPROCHE SPATIALE DES SYSTÈMES DE RISQUES ET DE LEURS DIFFUSIONS

Introduction

La démarche prend le parti d'envisager la coupure électrique comme un évènement complexe imbriqué dans un enchevêtrement de relations spatiales et temporelles, et nous tenterons de démontrer les enjeux de cette complexité. Vouloir montrer la complexité d'un objet de connaissance est une ambition louable, qui peut pourtant devenir contre-productive si elle tend à simplement rendre compliqué quelque chose de simple. Aussi un enjeu de cette partie est également de montrer qu'il existe un réel intérêt, en termes de connaissance, d'anticipation et de gestion des risques, à passer d'une approche strictement réticulaire des évènements à une approche autour des interactions réseaux - territoires.

On pourra s'étonner de voir alterner, indifféremment dans le texte, les formules « interactions réseaux territoires » et « interactions territoires réseaux » sans davantage de précision ; cette inattention de départ n'a volontairement pas été modifiée par la suite, dans la mesure où elle n'impacte en rien la signification de la formule, et met en avant le fait qu'il n'existe pas de début dans cette boucle systémique ; les deux termes sont donc strictement identiques au niveau du sens.

Dans un premier temps, nous présenterons l'optique générale de la démarche et l'originalité de son positionnement par rapport aux recherches existantes sur la thématique des risques et de la vulnérabilité des réseaux. L'intérêt et la pertinence du choix de considérer les coupures électriques comme un cas d'école pour l'analyse des systèmes de risques sera également décrit dans cette première section. Les fondements théoriques et méthodologiques d'une approche spatiale des systèmes de risques liés aux réseaux feront l'objet de la seconde section et s'organisent autour des deux piliers « Espace, réseau et système » et « Espace, risque et système ». Ces fondements nous permettront de consolider notre formalisation des systèmes de risques et des espaces à enjeux, puis de développer plus en détail, la problématique et la démarche de cette recherche doctorale.

2.1 OPTIQUES GÉNÉRALES DE LA RECHERCHE

2.1.1. Ancrer les systèmes de risques dans les interdépendances des territoires et des réseaux

2.1.1.1. Positionnement par rapport aux démarches existantes sur les risques et la vulnérabilité des réseaux techniques

Compte tenu de l'intérêt et de l'effet de mode autour de la thématique des risques et des réseaux, en particulier quand celle-ci est présentée sous la dénomination d'infrastructure critique, l'état des recherches a, de manière assez logique et attendue, fait apparaître un nombre important de travaux et de modèles, à la fois récents et performants. Traitant de la diffusion des défaillances dans les réseaux électriques ou de l'interdépendance des réseaux, la complexité de ces méthodologies, ainsi que l'expérience et le nombre de chercheurs impliqués dans leurs développements, nous ont rapidement conduit à nous interroger sur l'apport que pourrait constituer, à l'échelle d'une recherche doctorale, une analyse géographique et spatiale de ces systèmes de risques.

Il n'y aurait aucun sens à vouloir placer cet apport au niveau de la modélisation électrique *stricto sensu,* ou de la connaissance fine du fonctionnement technique des réseaux : ce ne sont là, ni nos compétences, ni le champ disciplinaire dans lequel s'inscrit cette recherche. En revanche, si la dimension technique et réticulaire de ces évènements est particulièrement bien appréhendée, les modèles recensés ont une tendance à considérer le système technique (qu'il s'agisse du réseau électrique ou de plusieurs réseaux interdépendants) comme un système fermé et dépourvu de relations avec son environnement. Ainsi, l'état des recherches sur les systèmes de risques montre qu'il existe, dans l'ensemble, une certaine déconnexion entre d'un côté, les recherches sur la vulnérabilité des territoires et de l'autre, les recherches sur la vulnérabilité des réseaux.

Egalement, une partie notable des approches des risques de l'interdépendance des réseaux contient des procédures liées à l'analyse spatiale, ou du moins à l'utilisation des systèmes d'informations géographiques, sans pour autant que la place de l'Espace ne soit réellement prise en compte ou du moins clairement explicitée, tant au niveau de la démarche que du phénomène en lui-même. Il existe donc une sorte de décalage entre d'un côté, la complexité et la richesse des formalisations et des méthodes dédiées à la connaissance du processus et du réseau sur un plan structurel et technique, et de l'autre, une certaine « faiblesse » des formalisations et des méthodes autour de la dimension spatiale de ces évènements, alors que paradoxalement, cette dimension intervient déjà à plusieurs niveaux dans les traitements mis en œuvre dans ces démarches. On a pu l'observer dans la construction des courbes de fragilité qui repose fondamentalement sur l'analyse de corrélation spatiale, ou dans la liaison entre le modèle d'endommagement et le modèle d'impact économique dans le cadre des matrices entrée – sortie, et nous l'observerons à nouveau dans la partie 2, à propos de la démarche de délimitation des rapports d'interdépendance entre les réseaux, basée partiellement sur la notion de distance.

On peut donc penser qu'une prise en compte plus explicite et plus solide de la dimension spatiale dans la formalisation et la modélisation de ces systèmes de risques est une voie de progression envisageable. Cette meilleure prise en compte de l'Espace, ne doit pas être entendue comme une simple sophistication des méthodes liées au traitement des données spatiales, mais bien comme un changement de perspective par rapport aux systèmes de risques liés aux défaillances des réseaux. « L'approche géographique de l'espace est ainsi interpellée pour construire et proposer des modes d'expression des caractéristiques spatiales des systèmes » (Voiron, Chéry, 2005), en l'occurrence celles des systèmes de risques. Le parti

pris de cette recherche est donc d'adopter une approche territoriale et spatio-temporelle des systèmes de risques associés aux défaillances en cascade des réseaux techniques.

En amont des systèmes de risques, les interactions entre les réseaux techniques et différents types de perturbations naturelles sont abordées. La diversité des perturbations naturelles à l'origine du déclenchement des systèmes de risques ne doit pas laisser penser que nous avons la prétention d'être à la fois spécialiste des séismes, des inondations ou encore des tempêtes de neige. Notre attention se porte sur les différenciations spatiales que peuvent produire les aléas naturels plutôt que sur les processus qui génèrent ces divers aléas. Egalement, cette diversité se justifie par le fait qu'à nos yeux, le système de risques réside moins dans la nature de la perturbation à l'origine de son déclenchement, que dans la manière dont l'organisation du système territoire - réseau va produire cette perturbation puis réagir à elle, et ainsi potentialiser la réalisation de certaines chaînes d'impacts indirects.

De la même manière, au niveau des impacts indirects, c'est-à-dire en aval de la coupure électrique, la recherche intègre des impacts sur des réseaux techniques de natures différentes, mais ne se prévaut pas de l'ingénierie électrique, hydraulique ou en télécommunication. Si l'acquisition de certaines notions sur l'organisation technique ou la gouvernance des réseaux par exemple, s'est avérée indispensable, celles-ci ne constituaient pas une finalité mais une première étape pour développer une approche géographique et spatiale des systèmes de risques.

2.1.1.2. Les interdépendances territoires - réseaux comme perspective d'ensemble sur les systèmes de risques

Si une approche technique du système réseau peut convenir pour évaluer la diffusion des défaillances à partir de l'endommagement d'une ou plusieurs composantes, dès lors qu'on a la volonté de développer une approche plus holistique de l'évènement et du système de risques, tant au niveau de sa construction que de la diffusion de ses impacts, il s'avère indispensable de prendre en compte les interdépendances des territoires (espace et population) et des réseaux (infrastructure et service), et donc, dépasser la dimension purement technique de la panne électrique pour réinscrire celle-ci dans son contexte territorial, réticulaire, environnemental et sociétal : ce que nous appelons le système de risque.

Pour les systèmes de risques associés aux défaillances des réseaux techniques, les causes profondes qui conduisent à l'émergence d'évènements à risques de grande ampleur nous semblent organisées (organisables) autour de quatre axes :

- La croissance des réseaux techniques et de leurs interdépendances.
- L'interdépendance spatiale produite par la structure des réseaux techniques.
- La dépendance sociétale aux services fournis par les réseaux.
- La dépendance environnementale, l'exposition à des impacts naturels et la fragilité matérielle des réseaux techniques.

Dans ce cadre, la recherche ne porte plus uniquement sur la dimension réticulaire du système électrique, mais bien sur les interdépendances réseaux - territoires et les systèmes de risques

inhérents à cette interdépendance. La capacité de propagation des pannes sur des échelles spatiales importantes ne constituerait pas un risque si parallèlement la dépendance sociétale à l'électricité était très faible, ou si l'électricité était facilement substituable par une autre énergie. C'est donc la combinaison de ces phénomènes et non leur réalisation distincte qui constitue le terreau des systèmes de risques.

Un intérêt de cette recherche réside dans ce parti pris : considérer le risque au niveau des défaillances des réseaux techniques mais aussi et surtout, au niveau du comportement dynamique des systèmes territoriaux soumis à une perturbation des réseaux techniques. De plus, ancrer le système de risques dans les interdépendances des réseaux et des territoires plutôt que le « centrer » uniquement sur le réseau nous paraît une perspective plus adaptée à une analyse géographique puisque « le fondement de la géographie, est d'identifier et comprendre les lieux, les réseaux qui les lient, les territoires qu'ils forment. » (R. Brunet, 1995).

2.1.1.3. La panne électrique comme cas d'école pour l'analyse des systèmes de risques et de l'interdépendance des réseaux et des territoires

Bien que les réseaux électriques constituent incontestablement un fil rouge de cette recherche, la thématique de cette thèse reste avant tout les systèmes de risques, les effets des réseaux et les espaces à enjeux. Si le choix de porter une attention particulière au réseau électrique se justifie pour plusieurs raisons qui nous sont apparues assez tôt dans le travail de recherche, ce choix constitue en quelque sorte, un point de départ, une entrée vers la vulnérabilité et les risques dans les réseaux techniques interdépendants, dans un premier temps, puis, plus précisément, vers les systèmes de risques, les espaces à enjeux et l'interdépendance des réseaux et des territoires. Le choix du réseau électrique trouve plusieurs explications, parmi lesquelles nous présenterons, sans ordre particulier, les plus cruciales pour notre approche.

- En premier lieu, les réseaux électriques exercent une forte dépendance sur l'ensemble du système technique ; la majorité des réseaux techniques (eau, communication, transport ou gaz) ont besoin d'électricité pour fonctionner parfaitement, même si cette dépendance est de nature et d'intensité variable selon les réseaux. Lui-même dépendant de manière indirecte des autres réseaux, le réseau électrique est au cœur des interdépendances du réseau technique.

- Ensuite, les réseaux électriques, en particulier dans les territoires développés, reposent sur des interconnexions de longues distances et produisent donc des relations de fortes interdépendances spatiales à petite échelle qui induisent d'importantes capacités de propagations des impacts locaux.

- Egalement, les réseaux électriques possèdent une possibilité importante d'endommagement ou de dysfonctionnement face à des perturbations de natures très diverses, pouvant être exogènes (aléas naturels, anthropiques), ou « endogènes » (pic de consommation non anticipé, virus informatique ou même une grève).

- Enfin, les systèmes sociétaux et territoriaux possèdent une forte dépendance à l'électricité ; cette dépendance touche à des degrés variables l'ensemble des populations, des entreprises et des services de secours, et constitue un facteur, aggravant voire nécessaire de la transformation de l'incident technique en risque territorial.

Un autre intérêt du choix du réseau électrique concerne le caractère « récent » et original du développement spatial de ces réseaux, sur lequel nous reviendrons par la suite. A l'échelle d'un siècle, l'électricité qui était encore un luxe dans les années Vingt, est devenue un « facteur d'égalité » durant les Trente Glorieuses (Desjeux et al., 1996), pour finalement s'établir comme un bien de première nécessité et même un droit, depuis le milieu des années 1980 en France. Ainsi, le développement des sociétés et des territoires aboutit à un système dans lequel le bon fonctionnement des réseaux techniques conditionne de manière inédite l'habitabilité des territoires et plus largement, la sécurité et le fonctionnement des sociétés. En considérant que ce risque n'existait pas, ou du moins pas sous cette forme et à cette ampleur, il y a encore peu de temps, la question de l'émergence des risques associés au développement des réseaux et des territoires, devient particulièrement intéressante à analyser.

2.2. LES FONDEMENTS THÉORIQUES D'UNE APPROCHE SPATIALE DES SYSTÈMES DE RISQUES

2.2.1. Espace, réseau et système

2.2.1.1. Les interdépendances réseaux-territoires et la complexité spatiale

Différenciation et interaction spatiale

Pour traduire l'optique générale de la sous-partie précédente en problématique, puis en démarche géographique, les fondements théoriques sur lesquels cette recherche s'est construite sont ceux de l'analyse spatiale et de l'analyse de système, avec une attention particulière portée aux propriétés systémiques de l'organisation spatiale des territoires, dues à leurs interactions avec des réseaux techniques. Ces deux piliers ne sont pas conçus comme un ensemble d'outils mais comme un cadre de pensée plusieurs fois éprouvé dans l'analyse géographique des processus de transformation des systèmes territoriaux à différentes échelles spatiales, face à différents enjeux et en s'appuyant sur différentes méthodes (Auriac, 1979, Durand Dastès, 1984, Le Berre, 1986, Voiron, 1992, Chéry, 1998, Basse, 2010).

Dans ce cadre, l'espace est envisagé comme un tout complexe, composé d'éléments naturels et anthropiques et d'éléments invisibles constitués par les relations tissées entre les lieux. Il est en outre doté d'une matérialité représentée par les distances, les espacements, les formes et les positions relatives des lieux. L'espace est considéré comme un agent ; si la société produit l'espace, ce dernier rétroagit sur l'action de la société, qu'elle en soit consciente ou non. L'espace est donc à la fois organisé et organisant (Charre, 1998, Voiron, al., 2010).

Différenciation et interaction spatiale sont fondamentalement liées: l'interaction forte entre deux sous-espaces peut contribuer à les différencier du reste du système spatial, alors que la différenciation spatiale peut favoriser les interactions entre des sous-espaces qui vont chercher à établir des relations basées sur leur complémentarité, « la relation implique altérité ; pas de liens sans lieux » (Offner, 2000), et l'altérité renvoie au caractère de ce qui est autre, différent. Le territoire peut alors se voir comme une combinaison d'aires spatiales différenciées (Ferrier, 1994). Il est également admis que « la complexité de l'espace se développe par l'hétérogénéité des besoins du groupe social, affectant à l'espace différents rôles et créant ainsi une différenciation du territoire en sous espaces spécialisés. » (Le Berre, 1986, cité dans Chéry, 1998). Pour répondre à ses besoins, le groupe social peut avoir recours à des réseaux, qui en fonction de leurs technologies, vont permettre aux individus de satisfaire un besoin en utilisant une ressource produite, traitée (pour les réseaux d'énergie et d'eau), émise ou simplement située (pour les réseaux de télécommunication et de transport) à des distances potentiellement importantes. La construction des réseaux techniques intervient donc fortement dans les mécanismes d'appropriation, d'aménagement des espaces et donc, dans le processus de territorialisation.

Cette spécialisation des espaces, pour permettre la satisfaction des besoins hétérogènes des sociétés, se retrouve particulièrement dans l'organisation globale du système électrique, à travers la différenciation croissante des espaces de production et des espaces de consommation. A l'échelle d'un siècle, et avec une accélération marquée suite au développement du nucléaire civil, des sites de production électrique de dimensions de plus en plus importantes ont vu le jour, la production d'énergie a donc eu tendance à se concentrer dans l'espace, on parle d'ailleurs de production électrique centralisée. Dans le même temps, l'urbanisation des territoires a contribué à la concentration spatiale de la consommation, et induit des modes de vie et d'habitation des territoires qui ont accru la consommation et la dépendance à l'électricité. La structure des réseaux est donc fondée sur des interdépendances à grande distance entre des pôles de production de taille très importante, et des pôles de consommation, eux-mêmes souvent de taille importante.

Assez logiquement, on peut en déduire qu'au cours du temps, ont également émergé dans l'espace, des lignes de tensions (et pas seulement au sens électrique), aux trajectoires de plus en plus contraintes et restreintes par ce double processus de concentration spatiale de la production et de la consommation, et aux impacts de plus en plus critiques pour la société. On peut toutefois nuancer cette tendance forte et prédominante jusqu'à très récemment, en considérant aussi l'intégration progressive, mais notable, de systèmes de production fonctionnant à des échelles plus locales, signifiant ainsi que les réseaux seraient « vraisemblablement en voie d'être transformés en profondeur par leurs diverses formes d'associations avec les techniques alternatives dans des systèmes composites. » (Coutard, Rutherford, 2009).

D'autre part, les capacités techniques des réseaux conditionnent en retour les choix de répartition spatiale des équipements, le potentiel de ressources exploitables pour un territoire donné mais aussi plus largement, l'organisation spatiale des interdépendances entre l'environnement et la société. Par exemple, si techniquement le réseau électrique ne pouvait

pas transporter de l'énergie sur de grandes distances à un coût rentable, l'interdépendance spatiale à échelle macro et l'organisation centralisée du système électrique, telle qu'on la connaît aujourd'hui, ne pourrait pas exister. Inversement, l'organisation du réseau technique est aussi contrainte par la localisation des ressources, des bassins de consommation ou encore des espaces protégés.

Le réseau peut donc être perçu comme le résultat d'une stratégie d'optimisation et de régulation des différenciations spatiales qu'il contribue lui-même à rendre possible afin de satisfaire les besoins des groupes sociaux d'un territoire. Cette conception du système réseau, dépendant d'autres systèmes parmi lesquels le système spatial, s'éloigne de la conception du réseau comme organisme indépendant, aux caractéristiques propres et autonomes que semblaient envisager plusieurs recherches de la première partie. Dans le même sens, Jean Marc Offner mettait en garde contre les métaphores trompeuses des « tentacules de la pieuvre, [ou de] la toile de l'araignée, qui laissent croire à des logiques purement endogènes de développement des réseaux. » (Offner, 2000).

Parmi les propriétés systémiques de l'espace, le principe d'allotopie considère que « des phénomènes localisés dans un espace donné doivent souvent être expliqués par des facteurs causaux localisés dans d'autres espaces » (Klaessen, Paelink, 1979). Issu de l'économétrie spatiale, ce principe d'allotopie est assez proche des concepts d'interaction ou d'interdépendance spatiale que l'on retrouve plus fréquemment en géographie. Ce principe d'allotopie reste peu pris en compte dans l'analyse géographique des risques et plus largement dans la modélisation des dynamiques des systèmes spatiaux (Banos, 2006). Pour un géographe, la définition de l'interdépendance géographique ou géospatiale, que l'on retrouve dans les recherches sur la vulnérabilité des infrastructures critiques, apparaît assez restrictive puisqu'elle se limite en fait, à la notion de proximité spatiale et de co-localisation entre deux tracés de réseaux (chapitre 1). Cette définition est assez peu comparable avec les concepts d'interactions ou d'interdépendances spatiales tels qu'ils sont habituellement entendus en géographie : « l'interaction spatiale est l'ensemble des processus par lesquels ce qui passe en un lieu peut retentir sur l'évolution d'autres lieux. » (Pumain, Saint-Julien, 2001).

Ce décalage entre l'interdépendance géographique ou géospatiale des recherches techniques (chapitre 1), et l'interdépendance spatiale définie en géographie, constitue également une originalité de la démarche et témoigne de notre volonté de placer la structuration spatiale induite par l'organisation des réseaux, et plus largement les interdépendances entre les réseaux et les territoires, au centre de notre analyse des systèmes de risques.

Cette structuration spatiale des systèmes de risques par les réseaux est susceptible d'opérer à trois niveaux (Offner, Pumain, 1996) :

- au niveau de l'étendue du système de risques, le réseau fixe les limites du territoire qu'il fait fonctionner, et donc du système de risques que son dysfonctionnement pourrait directement engendrer.
- Au niveau de la taille des mailles, la différenciation spatiale des systèmes de risques.
- Au niveau du poids relatifs de certains nœuds par rapport à d'autres, et donc de l'impact que pourrait avoir leur endommagement sur les autres nœuds du réseau.

Pour le second point, on peut rajouter que sous l'effet de la structuration des réseaux, des mailles (irrégulières) nouvelles apparaissent dans l'organisation spatiale des systèmes territoriaux :

- certaines mailles sont très lâches, et sont directement rattachées au processus de développement des réseaux à grande distance et à l'apparition de hubs dans le réseau électrique, tant au niveau de la répartition spatiale des unités de production, que de la topologie des réseaux de transport et de distribution électrique.
- D'autres mailles sont très resserrées, elles correspondent à la différenciation spatiale fine entre des sous systèmes spatiaux, induite par exemple, par l'organisation des réseaux de distribution.

Ainsi, les interdépendances des réseaux techniques induisent de l'interaction spatiale puisque deux espaces connectés, même situés à de fortes distances sont susceptibles de se trouver dans un état similaire si une composante venait à être impactée. Assez logiquement, on en déduit que le réseau structure la dynamique spatiale de certains systèmes de risques, puisqu'il rend solidaires différents éléments des systèmes territoriaux, et permet aux lieux de faire système. Offner indique également que « pour raisonner juste en matière de réseau, c'est une géographie des interdépendances qu'il convient de mobiliser, où les lieux ne possèdent pas de valeur intrinsèque mais font systèmes » (Offner, 2000) ; dans nos systèmes de risques, cela signifie donc que l'analyse de la vulnérabilité d'un lieu n'a de sens que si elle considère la vulnérabilité des systèmes de lieux dans lesquels ce lieu s'intègre et avec lesquels il entretient des relations d'imbrications, de dépendances ou d'interdépendances de nature et d'intensité variables. C'est donc dans une logique de géographie des interdépendances spatiales que nous aborderons les problématiques d'infrastructures critiques, et plus précisément des espaces à enjeux dans les systèmes de risques, associées à l'endommagement ou au dysfonctionnement des réseaux.

Les effets de réseaux

A ce stade, il nous faut préciser un élément pour éviter toute confusion et méprise sur la notion d'effets de réseaux telle qu'elle sera entendue dans ce travail. En effet, la notion d'effet structurant des réseaux qui sous-tend une partie de cette recherche a déjà fait l'objet de plusieurs remises en cause et discussions dans la littérature scientifique sur les réseaux de transports. Cette thèse comportant justement la notion d'effets de réseaux dans son intitulé, il nous paraît important de préciser certains éléments permettant de comprendre pourquoi le recours à cette notion est justifiable dans notre contexte. Précisons d'abord que l'idée que dénoncent certains travaux critiques, porte assez spécifiquement sur les relations entre l'implantation d'une infrastructure de transport et le développement du territoire qui accueille cette implantation (Offner, 1993, Plassard, 1997, 2003).

Ainsi, les deux éléments remis en cause dans la majorité de ces travaux sont d'une part, l'existence d'une causalité déterministe et univoque dans la relation accessibilité – développement du territoire (effet pouvant à ce titre être évalué à partir d'un indice démographique, économique ou social), et d'autre part, les dérives de l'utilisation de ce

concept conduisant à sa « mystification scientifique et politique » (Offner, 1993). En ayant recours à l'idée d'effets de réseaux, notre idée n'est absolument pas de contredire ces critiques et prétendre qu'une gare immense au milieu du désert est inévitablement vouée à devenir une mégapole.

Mais il est peut être restrictif de limiter la question des effets de réseaux, d'une part, à la question du développement, et d'autre part, à la question du territoire dans sa seule dimension démographique, économique et sociale. Si l'effet structurant du réseau sur la dynamique territoriale prête à discussion, nécessite une mise en garde contre les amalgames et peut s'envisager au mieux comme une hypothèse, au pire comme un mythe, les effets spatiaux des réseaux (Bakis, Grasland, 1997) paraissent moins discutables, en particulier pour les réseaux techniques. Cette nuance entre effets de réseaux sur l'espace et effets de réseaux sur le territoire est donc importante et justifie en partie notre recours à cette notion. Elle signifie que ce n'est pas spécifiquement dans les changements de pratiques ou de perceptions de l'espace par les populations, que nous allons postuler l'existence des effets des réseaux, mais plus simplement dans les relations spatiales qu'induisent les réseaux.

On pourra d'ailleurs noter que dans l'intitulé de la recherche, la notion d'effets de réseaux est rapprochée du concept d'espaces à enjeux et pas directement de celui de territoires. La dimension territoriale sera prise en compte dans un second temps, en particulier à travers la question de la dépendance des sociétés aux services fournis par les réseaux, néanmoins pour reprendre une distinction déjà soulignée dans le chapitre 1, cette dimension de la dépendance sociétale porte peut être moins sur la dimension matérielle du réseau en tant qu'infrastructure, que sur la dimension immatérielle et quasi-culturelle du réseau appréhendé en tant que moyen de fourniture de services et de biens de consommations.

Le réseau possèderait ainsi plusieurs niveaux de spatialités :

- D'abord dans sa matérialité, le premier effet du réseau technique sur l'espace est tout simplement l'occupation de portions du sol terrestre par des infrastructures linéaires ou ponctuelles, souterraines, situées au niveau du sol ou encore aériennes.

- Le second niveau de spatialité du réseau réside dans les bassins de dépendance que l'on va pouvoir associer à certaines composantes du réseau. Un poste de distribution du réseau électrique alimente une zone, un autre poste alimente une autre zone, il y a donc une force d'individuation et de différenciation du système spatial liée à la structure du réseau. Nous verrons dans la sous-partie suivante que ce niveau de spatialité est imbriqué et comprend, en fait, plusieurs niveaux d'organisation, liés en fonction de l'organisation et de la dépendance, à l'intérieur et entre les réseaux techniques.

- Enfin le troisième niveau de spatialité correspond à la globalité du système réseau, qui induit une forme de « solidarité » entre l'ensemble des territoires, à la fois liés à ce système et liés par ce système.

Également, il convient de préciser que l'utilisation du terme « effet » ne présume pas d'une relation déterministe, ni dans l'action du réseau sur le territoire, ni dans celle du réseau sur l'espace. L'effet de réseau possède une dimension stochastique dans le sens où une même cause sur un même espace possèdera plusieurs effets possibles, l'effet de réseau sur l'organisation spatiale est donc multi potentiel et possède même des logiques contradictoires. On peut souligner par ailleurs que l'interaction est définie comme étant un concept « fondamental, initial, qui exprime le lien, l'échange, la dépendance et parfois la causalité. » (Vermot Desroches, 1994, Decoupigny, 2000) ; la question de la transformation, rare mais possible (le « parfois » de la citation précédente) du lien spatio-réticulaire (observable à travers la structure du réseau) en causalité spatiale (un facteur de diffusion des impacts dans les systèmes de risques, par exemple) paraît alors essentiel.

En effet, elle pose en partie le problème de l'anticipation des systèmes de risques : dans quelle mesure, où, pourquoi et comment, les liens et les structures spatiales observables *a priori* dans l'organisation des composantes d'un ensemble technique en réseau, sont-ils susceptibles de se transformer en structures de causalités spatiales, et facteurs potentiels de déclenchement, d'amplification et de diffusion des systèmes de risques ?

Sur un plan conceptuel, cette liaison entre une structure du système spatial, induite par l'organisation des réseaux techniques, et une forme de causalité spatiale « dynamique » caractéristique d'effets dominos dans les systèmes de risques, peut s'envisager dans une perspective davantage morphologique. En période de stabilité dans la mesure où l'approvisionnement des territoires par les réseaux techniques est le plus souvent continu dans l'espace et dans le temps, la structuration des réseaux techniques ne produit pas de différenciation spatiale visible, la forme spatiale est homogène du point de vue de son interaction avec le système technique (dans l'hypothèse d'une couverture exhaustive). En période de stabilité, le réseau est donc un facteur de cohésion et d'égalité des conditions d'habitabilité des territoires. L'ensemble des sous-espaces est « alimenté » en énergie.

En fonctionnement perturbé, peuvent par contre apparaître, de manière relativement temporaire et simultanée, un ensemble de différenciations spatiales, qui correspondent au passage transitoire d'un état homogène vers un état hétérogène du système spatial. Ainsi, la différenciation spatiale observable pendant la coupure électrique (espace coupé - non coupé), est un reflet de la structure invisible en période de stabilité ; la panne rend visible une structure spatiale sous-jacente du territoire, qu'on pourrait qualifiée de structure spatio-technique. La connaissance de cette structure spatiale et de son fonctionnement dynamique nous paraît d'un grand intérêt pour la question des systèmes de risques liés à l'interdépendance des réseaux.

D'autre part, on peut préciser que même dans une courte échelle de temps, cette structure spatiale est mouvante, non stationnaire (voire instable) parce qu'elle n'est pas uniquement déterminée par la matérialité du réseau mais également par l'intensité et la répartition des flux qui la parcourent. Un même évènement, endommageant exactement les mêmes équipements électriques ne produira pas nécessairement la même répartition des espaces coupés, et donc des effets dominos similaires selon l'intensité des flux, la disponibilité des ouvrages de

production ou encore les choix réalisés par les opérateurs dans les centres de conduites des réseaux par exemple. D'une journée à l'autre et même d'une heure à l'autre, un même incident sur le système technique peut donc se transformer en panne générale, tout comme il peut être totalement intégré dans le fonctionnement du système et n'engendrer aucune nuisance ou menace pour le fonctionnement des territoires et la sécurité des populations. On retrouve ici les problèmes inhérents à la complexité spatiotemporelle et au faible niveau de prévisibilité caractéristique des systèmes de risques déjà évoqués dans le chapitre 1.

2.2.1.2. L'importance de l'imbrication et de la hiérarchie des réseaux dans le processus de structuration spatiale.

Les deux axiomes de Bunge : « tout système, à l'exception de l'univers, est un sous-système d'un autre système », « chaque chose concrète est soit un système, soit une composante d'un système » (Bunge, 1986), postulent qu'une unité spatiale ou un élément de cette unité, appartient toujours à plusieurs structures territoriales, économiques et administratives et que ses propriétés peuvent changer en fonction du niveau spatial et de la problématique considérés. Ici, nous considèrerons également le fait qu'une unité spatiale ou un élément de cette unité appartient à plusieurs structures techniques en réseaux. Les systèmes territoriaux sont donc généralement hiérarchisés. La théorie de la hiérarchie (Allen, 1982) postule qu'un système hiérarchiquement organisé est un système imbriqué qui exhibe un comportement global limité par les interactions de ses composantes de niveau inférieur et par des contraintes imposées au niveau supérieur (Marceau, 2008).

D'évidence, les réseaux sont la pièce maîtresse de l'articulation des territoires. Mais si le rôle des réseaux de transport dans le fonctionnement des territoires (en mode normal ou en mode dégradé) a fait l'objet de très nombreux travaux, celui des réseaux électriques et plus largement des réseaux techniques, dont le caractère majeur n'est plus à démontrer, a été en revanche peu étudié. Les relations territoire-réseau qui sont examinées ici concernent les interconnexions des réseaux et leurs conséquences en termes d'interdépendances, d'impacts et de vulnérabilités.

Cette dimension imbriquée peut s'observer au niveau de la « production » du système territorial , si on aborde la différenciation spatiale en tant que processus, défini comme « une dynamique complexe faite de niveaux d'organisation hiérarchisés et enchevêtrés qui implique l'imbrication de nombreux processus dont l'action se manifeste à des instants différents et selon un jeu d'échelles spatiales multiples combiné à un jeu d'échelles temporelles tout aussi diversifié » (Le Berre, 1986). Elle s'observe également au niveau de la différenciation, en tant qu'état différencié du système spatial, en considérant par exemple que l'alimentation électrique d'un quartier dépend à la fois du réseau de distribution électrique qui va déterminer une première différenciation par rapport à d'autres quartiers, qui dépend lui-même du réseau de transport électrique qui va déterminer une seconde différenciation spatiale à l'échelle régionale, qui dépend lui-même d'un ou plusieurs sites de production, eux-mêmes dépendants de ressources variables dans le temps et dans l'espace.

Ainsi, les réseaux techniques potentialisent un état différencié du fonctionnement territorial à partir d'une structure spatiale qui est à la fois :

- mouvante en fonction de la structure du réseau, de la répartition ou encore de l'intensité des flux.
- Invisible en période de stabilité, dans la mesure où l'approvisionnement des territoires par les réseaux techniques est le plus souvent continu dans l'espace et dans le temps.
- Imbriquée puisque chaque réseau technique peut induire des formes sous-jacentes de différenciation spatiale qui s'imbriquent avec celles des autres réseaux. Chaque sous-espace appartient donc à plusieurs structures « spatio-techniques » induites par l'organisation des réseaux, structures qui sont elles-mêmes interdépendantes, c'est-à-dire qu'une différenciation à l'échelle d'une structure peut engendrer une différenciation à l'échelle d'autres structures.

2.2.1.3. L'importance de l'imbrication et de la hiérarchie dans le processus de diffusion spatiale

L'importance de la hiérarchie et de l'hétérogénéité dans l'organisation des réseaux complexes, décrite dans le chapitre 1, nous amène à considérer l'imbrication comme un concept essentiel pour la compréhension des structures spatiales organisées par ces réseaux d'une part, et des dynamiques spatiales possibles des systèmes de risques, d'autre part. Cette structure hiérarchisée et multi-niveau implique une dimension à la fois horizontale et verticale dans la diffusion des impacts des systèmes de risques, que nous avons déjà pu observer notamment dans la figure 14 du chapitre 1 sur les différentes trajectoires d'évènements à risques liés aux défaillances des réseaux. On retrouve en fait dans ces trajectoires et dans cette structuration imbriquée de la forme spatiale des systèmes de risques, certaines analogies fortes avec les principes du modèle de diffusion de l'innovation.

Proposés dans leurs bases initiales dès les années 1950 par Hägerstrand, ces principes ont depuis, servi de bases théoriques dans de nombreux travaux sur la diffusion des phénomènes dans l'espace, appliquée à des thématiques variées comme la diffusion du virus HIV aux Etats-Unis, à partir de données observés entre 1993 et 1997 (Gould, 1997) ou encore la diffusion du travail intérimaire en France, à partir de données observées entre 1980 et 2000 (Daudé, 2002). Une hypothèse forte de ce modèle de diffusion spatiale est que la propagation d'une innovation s'appuie sur un principe de hiérarchie des lieux ; le modèle d'« Hägerstrand montre par exemple que l'on peut décomposer selon différentes échelles spatiales, les réseaux de communication individuels. (…). L'information circule donc horizontalement, entre niveaux équivalents, mais aussi verticalement, entre niveaux différents, assurant ainsi la dissémination de l'information sur l'ensemble de l'espace géographique. » (Daudé, 2002).

Dans la figure 15 (Hagget, 1979), la diffusion de l'innovation est initiée dans une ville de rang moyen, San Francisco, étape A, puis se diffuse localement vers des villes de rang inférieur dans l'étape B, l'étape C intervient au bout d'un certain temps et consiste en une sorte de « bond » vers un niveau supérieur de diffusion du processus qui s'appuie alors sur une ville de premier rang, qui à son tour va rediffuser rapidement cette innovation aux villes de rangs moyens lors de l'étape D. L'étape C peut se voir comme une sorte de bond scalaire, un effet d'escalade, tel que nous avons tenté de le décrire dans le cadre des grandes pannes des

systèmes techniques. Le modèle d'Hägerstrand prend aussi en compte l'existence d'effets de barrières qui vont limiter la propagation du phénomène. Plusieurs typologies d'effets de barrières sont alors envisageables, par exemple des barrières totalement absorbantes qui vont rendre impossible la diffusion du phénomène vers un sous-espace, des barrières réfléchissantes qui vont dévier la trajectoire de diffusion du processus, ou encore perméables qui laisseront passer une partie restreinte du flux et donc freiner la diffusion (Saint-Julien, 1985 ; Daudé , 2002). Un autre type de barrières qualifiées de « super-absorbantes », peut non seulement bloquer la diffusion mais également détruire le foyer émetteur du flux de diffusion.

Dans le cas d'une panne électrique, par exemple, les foyers émetteurs pourraient représenter les composantes initialement impactées dans le système de risques ; en fonction des composantes touchées, de leur situation dans l'organisation hiérarchique et multi niveau du système technique, ces foyers disposeraient d'un potentiel variable de diffusion dans l'espace. Les effets de barrières dans la diffusion des impacts reposeraient alors essentiellement sur la structure spatiale induite par l'organisation des réseaux dont nous évoquions les principes dans le début de ce chapitre. Nous reviendrons sur les aspects plus méthodologiques liés à la manière de délimiter cette structure spatiale, qui permet en fait de passer d'une approche en termes d'interdépendance d'infrastructures du système technique à une approche en termes d'imbrication et d'interdépendance spatiale des régions « spatio-techniques » dans le chapitre 3.

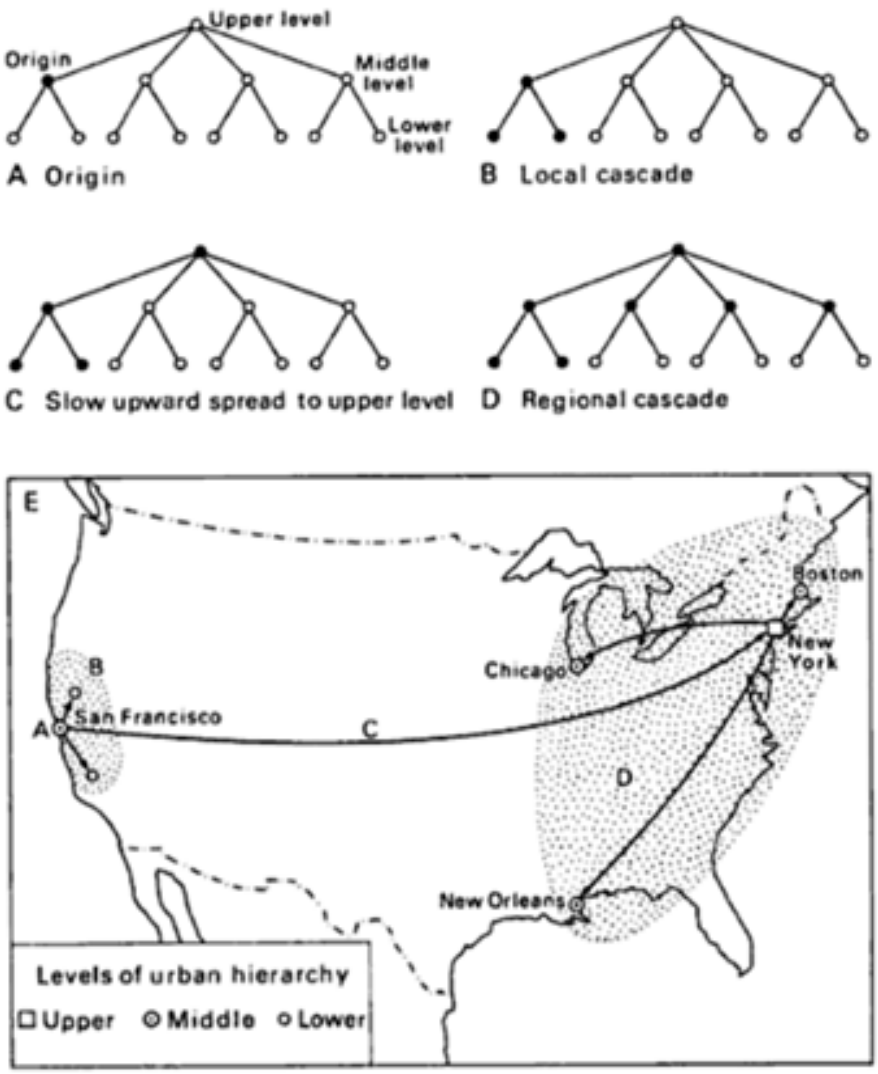


Figure 15 : La diffusion organisée par les niveaux de la hiérarchie urbaine (Hagget, in Ord Cliff, 1980).

2.2.2. Espace, risque et système

2.2.2.1. Le système de risques, composantes et propriétés

Dès 1931, la théorie des effets dominos ou « modèle de causalité des accidents » (Heinrich, 1931) formalisait une situation de risque industriel sous formes de séquences successives. Les relations décrites dans la théorie des effets dominos étaient alors exclusivement linéaires et unidirectionnelles : par exemple, la chute d'un premier domino (environnement social) provoque la chute du second (erreur humaine, inattention), qui se traduit par une action dangereuse, produisant un accident et finalement la blessure d'un travailleur. Le retrait d'un seul domino dans la chaîne peut alors suffire à annihiler la possibilité de réalisation du dommage final et donc éliminer le risque. Malgré son caractère linéaire, la théorie des effets dominos peut être considérée comme une première formalisation « compliquée » des causes des accidents. Elle appréhende un sinistre comme la succession de plusieurs défaillances dont les mécanismes opèrent au-delà de la spatialité et la temporalité

évènementielle de l'accident (le facteur environnement social par exemple). Le caractère multidimensionnel de l'évènement catastrophique ou simplement accidentel est donc appréhendé assez tôt dans la gestion des risques.

Partons d'une définition du risque naturel assez classique, « le fait, pour des points bien localisés du globe, que l'éventualité d'une catastrophe doive être raisonnablement envisagée. » (Péguy, 1992 cité par Charre 2003). Cette définition a le double avantage de pouvoir être facilement étendue aux risques technologiques et d'associer directement le risque à « des objets géographiques, les territoires à risques » (Charre, 2003). De plus, elle met en avant l'incertitude qui entoure le risque sans présumer d'une méthode particulière pour la prendre en compte. En revanche nous verrons, que dans le cadre des systèmes de risques, les points ne sont pas nécessairement bien localisés, les limites spatiales ou temporelles ne sont pas clairement bien circonscrites, les systèmes de risques posent donc à la fois un problème d'incertitude et un problème d'imprécision. Traditionnellement, on associe le risque à deux composantes, l'aléa et la vulnérabilité ; l'aléa qui renvoie à une perturbation d'ordre le plus souvent évènementiel et externe, la vulnérabilité qui renvoie aux propriétés et aux caractéristiques du système affecté par cette perturbation.

Dans la problématique de La Société vulnérable, Jacques Theys soulignait déjà en 1987 le trop - plein sémantique autour du concept de vulnérabilité et l'utilisation de ce concept pour désigner autant « la dépendance ou la fragilité que l'insécurité, la centralité, la complexité, l'absence de régulations efficaces, le gigantisme ou la faible résilience » (Theys, 1987). La démarche d'analyse présentée en figure 16 imbrique ces différentes facettes de la vulnérabilité et peut même être considérée comme une appréhension systémique de la structure du risque. En effet, elle englobe à la fois l'exposition initiale du système à des perturbations, la capacité du système perturbé à produire des effets directs ou indirects et sa capacité de résilience. De plus, la dynamique du système n'est pas uniquement linéaire puisqu'il existe des rétroactions entre chacune des composantes du système. Le système ne se contente pas de subir passivement la perturbation, une fois perturbé, il produit une réponse, cette réponse comprend des effets directs et indirects dont certains sont susceptibles de produire de nouvelles perturbations, de nouveaux effets et d'entretenir le système de risques. Par exemple, les effets indirects de la perturbation d'un système faiblement résilient peuvent conduire par rétroaction, à fragiliser le système source et renforcer sa potentialité à créer de nouveaux effets directs en cas de perturbation.

D'autre part, on note que le concept de dépendance apparaît à la fois dans l'interaction de la perturbation avec le système source et dans l'interaction du système source avec les impacts directs et indirects. Par nature, la dépendance est le rapport entre, au moins, deux éléments. La référence marquée à ce concept dans le schéma d'analyse peut s'interpréter comme une volonté de mettre en avant le fait qu'une partie fondamentale de la vulnérabilité d'un système ne s'explique pas seulement par la nature et les propriétés de ses composantes, mais par les rapports qu'entretiennent ses composantes.
Ce concept de dépendance est également au centre de la démarche de Green (Green, 1990, cité dans Kasperson, 1995), géographe américain qui, dans le cadre de travaux sur les

inondations et les activités économiques, définit la vulnérabilité d'une activité en cas d'inondation en articulant les concepts de :

- susceptibilité, la manière dont la présence d'eau affectera les entrants et les sortants d'une activité.
- dépendance, le degré avec lequel une activité nécessite un bien spécifique comme entrant pour fonctionner convenablement.
- transférabilité, la capacité d'une activité à maintenir son fonctionnement en reportant sa demande, en utilisant des substituts ou en se relocalisant.

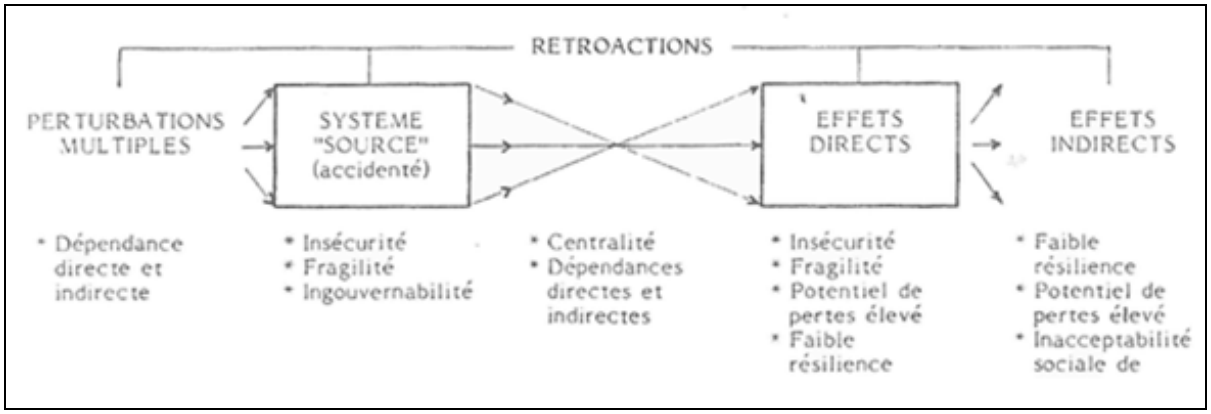


Figure 16 : Schéma d'analyse de la vulnérabilité d'un système (J. Theys, 1987).

Autre articulation originale pour définir la vulnérabilité dans les systèmes écologiques cette fois, Kasperson et al. proposent la combinaison des concepts de sensibilité et de résilience. La sensibilité y est définie « comme le degré de transformation d'une composante d'un écosystème pour une perturbation donnée», et la résilience comme « la capacité d'un écosystème à préserver sa structure, maintenir ses fonctions vitales puis à se restaurer après une perturbation » (Kasperson ali, 1995). Les sous-systèmes écologiques fragiles sont alors ceux qui combinent une forte possibilité de changement d'état (sensibilité), avec une faible résilience, c'est-à-dire, une impossibilité ou de grandes difficultés à intégrer la perturbation dans son fonctionnement pour préserver ou rétablir un état d'équilibre (catégorie 3 dans la figure 17).

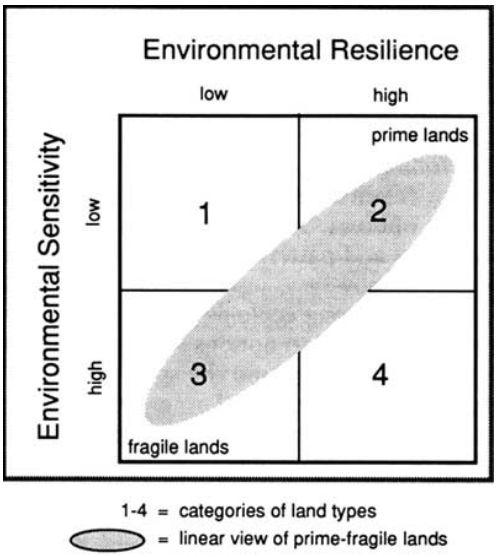


Figure 17 : La vulnérabilité écologique comme couplage de la sensibilité et de la résilience environnementale (Kasperson et al, 1995).

Nous reviendrons sur cette distinction tout à fait pertinente dans le cadre des systèmes de risques liés aux réseaux techniques, par ailleurs on peut d'ores et déjà préciser que l'articulation entre susceptibilité, criticité, résilience et dépendance (SCReD), présentée dans le chapitre 3 sur les méthodes de détection des espaces à enjeux, reprend plusieurs idées de ces références. De manière plus ou moins explicitée, les définitions rattachées aux risques, à ses composantes ou à leurs propriétés sont fortement imprégnées par les thématiques de la structure et de la stabilité des systèmes. Certes formulée différemment, il nous semble qu'on retrouve dans de nombreuses démarches de travaux sur les risques, l'idée que la vulnérabilité d'un système comprend l'analyse des composantes et des propriétés générales du système influant sur :

- sa propension à être endommagé par une perturbation.
- Sa capacité à aggraver et diffuser les effets des dommages initiaux.
- Sa capacité à maintenir ou retrouver un état d'équilibre malgré la perturbation.

On distingue classiquement deux grands types de recherches sur les risques, d'une part une approche de type ingénierie, reliée aux sciences dures, et centrée sur les mécanismes d'impacts et d'endommagements d'un système par une perturbation extérieure ; et d'autre part, une recherche relevant davantage des sciences humaines et sociales, et dont l'enjeu se situerait au niveau des capacités d'absorption et de réaction que développent les systèmes sociétaux face à ces perturbations. Cette trame de fond est tout à fait applicable aux systèmes de risques associés aux défaillances des réseaux techniques, et en particulier aux systèmes de risques de coupures électriques.

Elle permet en outre de mettre en lumière un net déséquilibre entre d'un côté, un nombre important de recherches techniques sur le risque de coupure électrique, dans lesquelles le réseau est souvent théorique ou dépourvu d'ancrage territorial ; de l'autre, une certaine rareté des travaux développant une approche territoriale ou sociétale de ces systèmes de risques en amont ou (et) en aval des endommagements des réseaux techniques. Ainsi peut-on dire que

malgré ses implications sociétales importantes, la coupure électrique reste à l'heure actuelle un risque considéré avant tout dans sa dimension technique.

Les catastrophes susceptibles d'affecter les territoires urbains sont, ici, considérées comme des systèmes de risques, qui consistent non pas en un seul impact, mais en une combinaison d'impacts directs et indirects se réalisant à des échelles spatiales et temporelles variables. Parmi les impacts potentiels, ceux affectant les réseaux ont un rôle particulièrement critique tant pour les dysfonctionnements sociétaux qui découlent de leurs interruptions que pour leur capacité à globaliser et étendre dans l'espace et le temps ces dysfonctionnements. La vulnérabilité d'un territoire ne se limite donc pas à la manière dont il subit un aléa ; une fois perturbée par un aléa déclencheur, l'organisation spatiale de ce territoire va plus ou moins potentialiser la réalisation de certaines chaînes de réactions dommageables et structurer la dynamique spatiale du système de risques. De plus, la vulnérabilité du territoire imbrique plusieurs échelles de structuration qui correspondent, entre autre, à celles des différents réseaux techniques.

Dès lors, il semble pertinent de considérer la vulnérabilité des systèmes territoriaux face aux risques de coupure électrique comme étant intégrée dans un système de risques. Si un système est un ensemble d'éléments en interaction dynamique (De Rosnay, 1977), dans le système de risques considéré ici, ces éléments appartiennent à deux types de systèmes en interaction, un système spatial et un système de réseaux (électricité, voirie, eau et assainissement), l'un et l'autre décomposés en sous-systèmes. Ces éléments subissent des évènements, prévisibles ou imprévisibles, naturels ou anthropiques, occasionnant des dommages. L'ensemble des interactions spatio-temporelles entre les endommagements directs des différents réseaux et les dysfonctionnements territoriaux engendrés par leurs combinaisons, peut, selon la configuration, l'emprise spatiale et les rapports d'interdépendance des différents réseaux, conduire à l'émergence d'impacts indirects et de nouvelles situations à risque. Les systèmes de risques renvoient à des trajectoires hypothétiques des systèmes territoriaux dont on souhaiterait qu'elles ne se réalisent pas.

Ces trajectoires sont plus ou moins évitables, plus ou moins connues, plus ou moins probables et même pourrait-on dire plus ou moins possibles, puisque plusieurs auteurs évoquent la notion d'effet de surprise pour envisager une situation dommageable qui se réalise alors qu'elle était jusqu'alors considérée statistiquement comme une trajectoire extrêmement improbable dans la dynamique du système. Les évènements catastrophiques ne sont pas considérés comme une perturbation externe que le territoire se contente de subir avec une plus ou moins grande sensibilité selon les composantes exposées ; le système territoire produit également le système de risques, il est dans une interrelation avec la perturbation, et pas dans une relation simple. Cette interrelation explique pourquoi un incident peut se transformer en catastrophe, et passer en quelques secondes d'une échelle très locale à une échelle régionale voire globale. Dans ce contexte, l'analyse de la vulnérabilité d'un lieu n'a de sens que si elle considère la vulnérabilité des systèmes de lieux dans lesquels ce lieu s'intègre et avec lesquels il entretient des relations d'imbrications, de dépendances ou d'interdépendances de nature et d'intensité variables.

C'est donc dans une logique de « géographie des interdépendances spatiales » (Offner, 2000) que nous aborderons les problématiques d'infrastructures critiques, et plus précisément des espaces à enjeux dans les systèmes de risques, associées à l'endommagement ou au dysfonctionnement des réseaux. Cette fragilité liée aux interconnexions et à la dépendance technique des territoires serait alors à l'origine de nouveaux systèmes de risques, dont l'anticipation devient particulièrement mal aisée puisqu'elle nous conduit à étudier non plus un mécanisme classique de cause à effets où l'importance des impacts territoriaux est relative à l'intensité de la perturbation, mais un système de risques où la gravité des impacts est relative aux systèmes territoriaux, susceptibles à la fois de les produire, les aggraver et les subir.

2.2.2.2. Un objet géographique encore mal défini : les territoires à risques

Le constat d'une définition insatisfaisante des territoires à risques est exprimé par de très nombreux chercheurs ; cette insatisfaction est d'abord relative au caractère polysémique du concept de vulnérabilité, auquel plusieurs auteurs ont répondu en intégrant un ou plusieurs concepts intermédiaires entre, avant, ou encore après l'aléa et la vulnérabilité. Nous en avons présenté quelques-uns, dans la sous-partie précédente. Mais des critiques plus profondes sur la formalisation des territoires à risques ont également été exprimées.

La première que nous retiendrons, porte sur la nature de l'espace dans l'analyse des risques. En effet, si les approches systémiques et les modélisations en dynamiques de systèmes des phénomènes de risques sont relativement nombreuses, les approches du système de risques et des défaillances en cascades en tant que système et dynamique spatiales font globalement défaut. Cette lacune est même perçue par certains auteurs comme plus fondamentalement liée à une prise en compte biaisée de l'espace et du territoire, dans l'analyse du risque : « le risque est une composante intrinsèque du territoire, qui a une ou des logiques spatiales. Le problème est que le territoire est plus souvent considéré comme un espace support de risques alors même qu'on devrait le voir comme quelque chose capable d'interagir avec le risque.» ou encore « il y a eu méprise sur l'objet risque. La pensée sur le risque reste une pensée essentiellement externalisante. C'est-à-dire qu'elle le traite comme un objet externe aux espaces qu'il touche. Or le processus de traduction donne à penser que le risque est littéralement ancré dans les espaces » (November, 2006).

La critique d'un territoire à risque où l'espace serait restreint à un rôle de support n'est en réalité pas spécifique à l'analyse géographique des risques. Elle peut être étendue plus largement à la question du rôle et de la prise en compte de l'espace dans la modélisation des phénomènes géographiques complexes et en particulier, ceux à l'interface de la Nature et de la Société (Voiron, 2006). En s'éloignant d'une conception purement « externalisante » de la question des risques et des territoires, celle-ci ne s'envisage plus uniquement dans une optique de protection des territoires face à des perturbations issues d'un environnement extérieur, mais dans une perspective « intégrée » qui porte sur la stabilité et l'équilibre entre les composantes sociales, sociétales et environnementales des systèmes territoriaux et donc sur leur aménagement durable. Le risque devient une propriété intrinsèque du territoire et non une propriété relative à une perturbation. Pour illustrer cette idée, on peut comparer le ou la géographe à une sorte de chimiste. Si dans sa démarche, les différents sous-espaces sont

considérés comme autant de tubes à essais dans lequel notre « chimiste » va intégrer des composantes sociales, environnementales ou économiques afin de déclencher des réactions et des phénomènes de différentes natures, alors l'espace est restreint à son rôle de support, il est neutre et n'intervient pas dans les réactions du système : les sous-espaces ne sont là que pour multiplier les expériences.

Ainsi, dans la cartographie des territoires du risque, les systèmes d'informations géographiques (SIG) ont permis d'accumuler et « croiser » de plus en plus de données sur les territoires afin d'établir des profils de vulnérabilités composites et synthétiques basés sur 5,10, 20, 40 et parfois bien plus d'indicateurs. On peut noter d'ailleurs qu'assez tôt dans le développement des SIG dans la communauté des géographes, la thématique des risques (en particulier naturel) a occupé une place importante, par exemple, un numéro spécial SIG de la revue Mappemonde édité en 1993 et intitulé « Facettes de SIG » regroupait déjà près de 25 contributions dont 4 portaient très spécifiquement sur la question des risques et de leur spatialisation grâce au SIG (Mappemonde, 1993).

Pour autant, les travaux méthodologiques sur la manière d'articuler ces indicateurs et les propriétés spatiales qu'ils sont sensés refléter dans les systèmes de risques sont plus rares, et aujourd'hui encore le passage de la vulnérabilité des territoires vers les territoires à risques se limite généralement à la superposition statique de périmètres d'aléa dont on ne peut connaître les limites qu'avec imprécision (mais qui sont pourtant représentées le plus souvent à partir d'un tracé net sur les cartes de risques) avec des profils de vulnérabilité établis au préalable, et dont les limites spatiales reprennent les périmètres administratifs et statistiques qui ont servi de base dans la collecte des données nécessaires à les établir, mais qui n'ont pas de réalité et de pertinence particulière dans le cadre du phénomène analysé. La complexité spatiale des systèmes de risques se résume en fait, le plus souvent, à l'aspect multithématique des indicateurs de vulnérabilité des territoires qui servent à le décrire, et le territoire reste de fait, le simple support du système de risque critiqué au début de cette sous-partie.

Si, « l'organisation formelle des SIG et la multitude d'informations qu'ils collectent en font des outils puissants d'aide à une démarche de modélisation. L'envers de cette complexité réside dans la nécessité de prise en compte de la complexité spatiale dès l'élaboration de l'application, ce qui oblige le géographe à penser l'espace avant même de l'étudier ». (Miellet, 1992). Le couple aléa-vulnérabilité qui sert le plus souvent de fondement à la cartographie du risque apparaît comme une limite dans la prise en compte de cette complexité spatiale des territoires à risques, qu'elle maintient par ailleurs dans une dimension passive. Cette limite s'avère d'autant plus pénalisante dans l'analyse d'effets dominos et de réactions en chaînes initiées par le comportement perturbé des systèmes territoriaux et non directement par cette perturbation. Pour reprendre la métaphore du chimiste, l'enjeu est alors de considérer l'espace et le territoire à la fois comme un support et comme un agent réactif qui intervient dans le déroulement du processus. L'articulation SCReD, présentée dans le chapitre 3 sur la modélisation spatiale des systèmes de risques a été conçue dans cette optique.

Si la première critique de la définition des territoires à risques présentée renvoie plus fondamentalement à la conception de l'espace et du territoire que sur le risque en lui-même ;

la seconde critique, sous une allure plus méthodologique, renvoie à la conception du temps et de l'incertitude dans les systèmes complexes. Cette seconde critique empruntée à (Charre, 2003) porte sur le fait que la définition des territoires à risques est le plus souvent construite dans un cadre probabiliste qui est en fait peu adapté, dans la mesure où il postule d'une hypothèse de stationnarité ne s'observant pas dans la nature et sur des périodes longues. Cette non-stationnarité est mise en avant dans le cas des risques naturels, avec la question du réchauffement climatique et des épisodes pluvieux extrêmes, « deux difficultés sont bien identifiées : les hypothèses requises par la statistique ne sont pas forcément réalisées (stationnarité, échantillonnage) ; une incompréhension liée à la complexité des probabilités, mais aussi sans doute à leur inadéquation en matière de gestion territoriale. L'objet géographique, territoire à risque, est donc mal défini. » (Charre, 2003).

« L'incompréhension liée à la complexité des probabilités » dans la citation précédente fait surtout référence à la dimension temporelle des probabilités qui s'exprime le plus souvent de manière datée et sur une période de retour. L'expression laisse en effet penser à une prévisibilité précise de ces évènements et favorise l'incompréhension ou du moins une représentation faussée du risque par une partie des populations mais aussi des gestionnaires des territoires (on peut comprendre qu'il n'est pas évident pour tout le monde d'admettre qu'une crue décennale ne se produit pas tous les dix ans ou encore que deux crues centennales se produisent parfois dans un délai de cinq ou dix ans).

Sur la question des ruptures, sans même parler de la non stationnarité des phénomènes climatiques, nous avons vu à quel point l'organisation des réseaux électriques, les interdépendances spatiales qu'ils induisent, les pratiques et les dépendances sociétales associées aux services fournis par ces réseaux ou encore les contraintes qui vont peser sur leur développement, ont profondément changé en peu de temps, et sont amenées à poursuivre cette évolution sans que celle-ci ne soit forcement linéaire, puisqu'on peut raisonnablement imaginer un scénario qui tout en restant complètement plausible, va plutôt à l'encontre des tendances lourdes qui ont constitué le réseau jusqu'à présent : le développement de réseaux locaux constituant une articulation efficace avec les grands réseaux, une maitrise de la demande énergétique fortement imprégnée dans les cultures, les modes d'habitations et de gestions des territoires et une stratégie de retour à un équilibre électrique global entre l'offre et la consommation fondée sur des équilibres à l'échelle des régions électriques.

Dans le cadre des systèmes de risques liés aux coupures électriques, l'hypothèse de stationnarité qui sous-tend un modèle probabiliste est assez peu recevable, et le caractère « émergent » de crises de grandes ampleurs associées à ces coupures, renforce ce caractère inadapté. Même si les pannes électriques à grande échelle existaient déjà il y a un demi-siècle, leurs récurrences ou leurs effets sur le fonctionnement des systèmes territoriaux ont fortement varié dans l'espace et dans le temps, et se posent en des termes différents en 2010 qu'ils ne se posaient en 1980 ou en 1950 ; d'autre part, nous avons souligné le caractère « hors cadres » de plusieurs évènements associés à ces défaillances des réseaux techniques, cette absence de cadre, c'est-à-dire de référentiels rétrospectifs fiables sur une longue période, contribue également à rendre l'approche probabiliste peu adaptée pour notre approche des territoires et des systèmes de risques. Nous reviendrons donc également dans le chapitre suivant sur les

méthodes issues de la théorie des possibilités (Zadeh, 1975, 1978), sur les espaces géographiques flous (Rolland May, 1987) et la gestion de l'imprécision, et sur le flou de type 2 dans le cadre de l'information spatiale (Mendel, 2002, 2004, Fisher, 2010) comme alternative aux modèles probabilistes, permettant de prendre en compte l'incertitude dans l'analyse des systèmes de risques dans un cadre statistique moins contraignant et sans doute plus adapté à notre problématique ainsi qu'à nos contraintes.

2.2.2.3. Les espaces à enjeux dans les systèmes de risques

Compte tenu des lacunes et des limites mentionnées dans la sous-partie précédente, fonder une approche spatiale des systèmes de risques exclusivement sur le concept de territoires vulnérables nous paraît délicat et peu adapté à notre contexte où le système territoire - réseau est à la fois source et cible du danger. Pour cette raison, nous aurons recours à la notion moins restrictive d'espaces à enjeux, dans l'idée que celle-ci nous permettra une formalisation plus aboutie de la complexité spatiale du système de risques.

La notion d'enjeu est utilisée dans l'analyse et la politique de gestion des risques depuis plusieurs années (MEDD, 2003). L'enjeu désigne dans ce cadre les personnes ou les biens susceptibles d'être impactés par une catastrophe, et l'espace à enjeu est entendu, dans une acception simple, comme une portion d'espace où est localisé l'enjeu. La vulnérabilité de l'enjeu est relative à une ou plusieurs qualités qui vont influer sur le comportement de l'enjeu face à une perturbation, par exemple, on va considérer que les populations en-dessous ou au-dessus d'un certain seuil d'âge, sont vulnérables, ou que des bâtiments construits dans tels ou tels matériaux sont plus vulnérables que d'autres.

A partir de cette réflexion qui porte sur les qualités des enjeux (et non des espaces), est généralement estimée la vulnérabilité des territoires en fonction de la quantité d'enjeux vulnérables que contiennent ces espaces. La dimension vulnérable de l'enjeu serait alors d'ordre qualitatif, alors que celle des espaces à enjeux serait d'ordre quantitatif puisqu'un espace devient un espace à enjeu parce qu'il contient une certaine quantité d'enjeux vulnérables et exposés (biens ou personnes). On retrouve donc dans cette conception de l'espace à enjeu face aux risques naturels, l'espace réduit à son rôle de support évoqué dans la sous-partie précédente.

La distinction entre espaces à enjeux statiques et dynamiques (Voiron, Olivier, 2005) permet de s'extraire de cette conception restrictive en considérant qu'il existe d'une part, des espaces à enjeux statiques, identifiables avant le déclenchement des catastrophes, et où sont localisés des populations ou des biens vulnérables, mais également des lieux essentiels à la gestion de crise et des secours. D'autre part, des espaces à enjeux dynamiques, « plus difficiles à discerner car ils n'apparaissent comme tels que dans des circonstances particulières. Leur émergence est liée, par exemple, au dysfonctionnement des relations intra-urbaines dans un contexte d'inondations » (Voiron, Olivier, 2005). L'idée d'émergence de nouveaux espaces à enjeux au cours de la crise est importante et renvoie aux questions d'effets dominos et de dynamique spatiale des systèmes de risques, elle implique de donner aux systèmes de risques une certaine épaisseur temporelle et à l'espace une dimension d'agent dans le système de risques afin de prendre en compte des impacts qui ne sont pas le résultat direct et immédiat de

la perturbation mais le résultat indirect et différé du comportement perturbé du système territoire-réseau.

Dans ce cadre, la notion d'espaces à enjeux dans un système spatial peut renvoyer à des sous-espaces qui ont à la fois une forte possibilité de changement d'état (impacté - non impacté) lors de l'impact initial du système de risques mais aussi dont le changement d'état s'il est avéré, serait fortement susceptible d'avoir un impact indirect sur le système de risques et sur la possibilité de changement d'état des autres sous-espaces. Ces deux aspects renvoient à la susceptibilité, comme degré de possibilité du changement d'état initial de sous-espace (s), et à la criticité comme degré de possibilité de changement d'état des autres sous-espaces du système spatial du fait du changement d'état de sous-espaces.

La susceptibilité, « composante spatiale de l'aléa » (Malet et al., 2006) se focalise sur les propriétés des espaces favorables aux déclenchements des systèmes de risques, on retrouve assez communément cette acception de la susceptibilité notamment dans l'analyse des mouvements de terrain (Barchi et al., 2003). La criticité, qui a déjà été abordée dans le chapitre 1, renvoie, quant à elle, au potentiel de diffusion et de déclenchements d'impacts indirects d'un sous-espace. La compréhension des effets de réseaux et des interdépendances spatiales qu'ils induisent devient alors une dimension incontournable de la détection des espaces à enjeux des systèmes de risques.

Susceptibilité et criticité constituent les deux premières propriétés de notre formalisation des espaces à enjeux et des effets de réseaux dans les systèmes de risques. Elles sont complétées par les propriétés de résilience et de dépendance. La référence au concept de résilience des systèmes permet d'introduire une dimension temporelle particulièrement importante pour notre recherche puisque la durée de l'interruption des services fournis par les réseaux, qu'il s'agisse d'électricité, d'eau, de télécommunication ou de mobilité détermine fortement l'apparition de nouveaux impacts indirects, ainsi que le niveau des pertes et des risques encourus par les populations. Cette conception de la résilience centrée, sur la dimension temporelle et la notion de durée, peut être considérée comme plutôt simple voire restrictive par rapport à celle développée sur la résilience des systèmes écologiques à partir des recherches de (Holling, 1973, 1986) ou de (Aschan Leygonie, 2000) sur la résilience des systèmes spatiaux.

Rappelons à ce sujet une distinction importante (Holling, 1996) entre la résilience « engineering », qui mesure un temps de retour du système à son état d'équilibre initial ou à un nouvel état d'équilibre (Pimm, 1984), par opposition à la résilience écologique qui plus généralement mesure « l'amplitude de la perturbation qui peut être absorbée avant que le système ne modifie sa structure en changeant les variables et les processus de contrôle de son comportement » (Holling, 1973). On retrouve donc une forme de résilience dans la définition de la vulnérabilité proposée par Jacques Theys, quand ce dernier définit la vulnérabilité comme « capacité des systèmes interdépendants à fonctionner sans accrocs en absorbant les perturbations extérieures, même les plus imprévisibles» (Theys, 1987). Nous assumons d'intégrer une conception simple et critiquable de la résilience, mais qui a le mérite d'être mesurable et propice à l'intégration efficace du Temps et de la durée dans l'analyse du risque. Cette conception simple de la résilience n'entre pas en contradiction avec notre volonté de

prendre en compte la complexité spatiale des systèmes de risques dans la mesure où elle est articulée avec d'autres propriétés spatiales relatives à la place de l'Espace dans la construction, le déclenchement et le déroulement des évènements à risques. La résilience renvoie alors à la durée de retour à un état d'équilibre des réseaux techniques et des systèmes territoriaux qu'ils desservent. D'autre part, on peut penser que le recours au concept de réversibilité serait ici préférable à celui de résilience, dans la mesure où il permettrait d'exprimer de manière assez semblable l'idée de retour à la stabilité, tout en évitant la confusion avec la résilience entendue dans son sens plus complexe et plus ouvert. Néanmoins, la réversibilité implique l'idée d'un système en équilibre stable, la stabilité d'un système repose alors sur un seul point d'équilibre, que le système va retrouver plus ou moins rapidement selon ses propres capacités et selon l'intensité de la perturbation.

Dans le cadre des risques et des systèmes territoriaux, le retour à un état initial est une idée qui correspond sans doute davantage à une réalité mathématique qu'à une réalité géographique. De même, au niveau de la restauration du système technique suite à des dommages importants, par exemple dans le cas de pannes électriques, la restauration du service électrique n'implique pas nécessairement la réparation des postes mais peut aussi correspondre à l'implantation de transformateurs de secours ou de nouvelles lignes provisoires ; il y a donc un retour à la stabilité, fondé sur la création d'un nouvel état d'équilibre, précaire et provisoire. Pour cette raison, nous préfèrerons le concept de résilience à celui de réversibilité du système pour introduire la dimension temporelle du système de risques. Enfin, la notion de dépendance déjà évoquée dans ce chapitre (Green, 1990) renvoie à la variabilité des impacts possibles de l'interruption de services d'un réseau selon les individus, les activités économiques ou encore les composantes des réseaux techniques concernées par cette coupure. Ainsi, dans certains contextes, certaines activités et certains individus faiblement dépendants vont pouvoir continuer à fonctionner et vivre de manière correcte, malgré l'absence de services fournis par les réseaux alors que pour d'autres cette interruption empêche toute possibilité d'activité et peut même constituer une menace vitale. Nous reviendrons dans le chapitre 3 sur l'articulation entre ces différents concepts de susceptibilité, de criticité, de résilience et de dépendance, mais surtout sur la mise en œuvre possible de méthodes permettant l'estimation de ces propriétés et la détection des espaces à enjeux dans les systèmes de risques.

2.3. DÉROULEMENT DE LA RECHERCHE

2.3.1. Problématique et hypothèses

Armé de l'état des connaissances et des fondements théoriques présentés au cours des deux premiers chapitres, il nous est désormais possible de formuler plus clairement la problématique et les questionnements principaux sur lesquels s'est construite cette recherche.

En prenant appui sur les fondements décrits précédemment, notre problématique porte sur la formalisation, la détection et l'anticipation des espaces à enjeux et des effets des réseaux dans les systèmes de risques. Elle interroge les forces de perturbations en sommeil dans

l'organisation spatiale et réticulaire des systèmes territoriaux et les possibilités de transformation d'un endommagement ou d'une panne d'un réseau technique en une ville, une région ou un pays en panne, un territoire à risque. Comment ces forces sont-elles constituées, comment évoluent-elles dans l'espace, dans le temps et comment est-ce qu'elles se déclenchent et passent d'un système de risque (force) à un système de crise (forme) ?

De cette problématique principale sur l'intelligibilité et la prévisibilité des dynamiques spatiales des systèmes de risques découlent plusieurs types de questionnements.

Au premier abord, le recours à la terminologie des risques et des catastrophes pour évoquer une coupure électrique par exemple, peut sembler une exagération, un abus de langage reflétant une tendance à dramatiser une situation plutôt anodine et banale. S'il est indéniable qu'à l'échelle individuelle, la coupure électrique peut passer inaperçue ou même parfois laisser un bon souvenir à ses « victimes » ; elle peut également être extrêmement paralysante pour les systèmes territoriaux et même fatale aux personnes les plus dépendantes et isolées. Une des premières questions est donc de savoir dans quelle mesure les coupures électriques sont des risques et comment on peut mesurer le niveau de gravité des effets dominos associés à ces coupures électriques.

Sur cette question de la gravité des évènements, nous avons constaté que la capacité de diffusion à petite échelle des impacts dans les réseaux électriques, combinée à un niveau accru de dépendance électrique des populations, des autres réseaux techniques et plus largement du fonctionnement territorial, fait naître des évènements « inédits » en termes de complexité, d'échelle et de gravité des pertes humaines et économiques associées aux coupures électriques ou à d'autres endommagements des réseaux techniques. De plus, la récurrence de ces évènements à petite échelle semble connaître une accélération depuis ces dernières années. Plusieurs recherches soulignent par exemple, que les coupures électriques les plus importantes en termes de nombre de clients touchés, de coûts et d'impacts se sont essentiellement déroulées à partir des années 2000 et que ces pannes à très petite échelle, sont de dimension et de récurrence supérieures à ce que les modèles de prévision classique laissent penser. Certaines coupures récentes peuvent d'ailleurs être classées sans aucune difficulté dans la catégorie des « cataclysmes » d'après les échelles classiques de graduation de niveau des risques, en particulier sur le plan des pertes économiques.

On peut alors se demander si le développement des réseaux techniques, des interconnexions à grande distance, l'interdépendance spatiale et la dépendance sociétale qu'ils induisent, sont des facteurs de robustesse ou de vulnérabilité des systèmes territoriaux. Les éléments exposés au premier et second chapitres semblent montrer qu'il est préférable de concevoir cette question en termes de dialogiques, certaines organisations des réseaux complexes induisent un système qualifié de RYF, c'est-à-dire à la fois robuste et fragile. On a également pu observer théoriquement que dans les structures réticulaires complexes peuvent apparaître des zones d'hypersensibilités locales, fortement critiques, qui concentrent l'incertitude de la trajectoire du système dans le sens où leur changement d'état est capable de transformer l'ensemble des composantes du système. René Thom parle de ces zones comme étant le potentiel « siège de catastrophes généralisées ». La détection de ces zones est évidemment d'un intérêt essentiel

pour notre problématique d'espaces à enjeux dans les systèmes de risques et justifie le recours à la notion de criticité dans notre recherche.

Les défaillances en cascades des réseaux techniques peuvent devenir un risque majeur dans la mesure où elles impliquent un processus de désorganisation des systèmes territoriaux et sociétaux. Pour relater ces évènements, on désigne souvent dans la presse ou dans nos récits individuels, ces phénomènes de désorganisation sous l'intitulé de « chaos », pourtant une hypothèse de cette recherche est qu'il existe, derrière le désordre apparent des systèmes de risques, une forme d'organisation spatiale dans ce processus de désorganisation territoriale et qu'il est de ce fait partiellement intelligible et partiellement prévisible. On retrouve ici une logique de base de l'analyse spatiale considérant que «c'est précisément le manque d'indépendance - l'interdépendance - des phénomènes spatiaux qui nous permet d'introduire l'idée de modèle, et donc de prévisibilité et d'ordre dans le chaos et le manque apparent d'interdépendance des éléments dans le temps et l'espace" (Gould, 1970, cité par Cliff et Ord, 1973).

Nous faisons alors l'hypothèse que l'interdépendance, l'imbrication et la pluri-appartenance spatiale sont des propriétés systémiques essentielles pour expliquer les effets des réseaux et interviennent à la fois dans la construction et la réalisation des systèmes de risques.

En termes de méthodologie, la détection des espaces à enjeux et des effets de réseaux dans les systèmes de risques pose également le problème de l'incertitude et de l'imprécision spatiale. Dans une logique rétrospective, la compréhension des systèmes de risques et la cartographie d'évènements complexes *a posteriori* interrogent sur la manière de produire de la connaissance fiable sur un territoire et un évènement, à partir de données hétérogènes dont l'incertitude et l'imprécision sur un plan factuel, spatial et temporel peuvent être importantes. Dans une logique d'anticipation des systèmes de risques, le problème va au-delà de l'imprécision spatiale des données d'entrées, il porte également sur la variabilité et la connaissance incertaine des mécanismes d'endommagement des réseaux par des perturbations externes, mais aussi des mécanismes de propagation à l'intérieur et entre différents types de réseaux, ou encore sur la manière dont la population, les secours ou la gouvernance sont affectés puis réagissent à cette perturbation des réseaux techniques.

En considérant que le risque réside dans le comportement perturbé de l'organisation territoriale et technique, et que ce dernier est partiellement incertain, on est donc conduit à introduire de l'aléatoire dans la composante spatiale et territoriale du risque, et plus seulement dans la composante externe de la perturbation. On peut alors se demander comment prendre en compte l'incertitude et l'imprécision dans le cadre de la détection des espaces à enjeux et des effets de réseaux dans les systèmes de risques, ou encore, comment passer des modèles de l'interdépendance des réseaux vers un modèle de l'interdépendance et de l'imbrication spatiale permettant d'anticiper la propagation possible dans l'espace, des dommages initiaux d'une composante du réseau technique.

Dans le cadre des applications, nous nous demanderons également, si au-delà de la diversité et du désordre spatial apparent observé rétrospectivement lors d'évènements impliquant des dommages et des défaillances en cascade, on ne peut pas identifier certaines règles ou

régularités dans l'organisation et la dynamique spatiale des systèmes de risques ; puis, à partir de ces éventuelles règles d'organisation, dans quelle mesure et comment il est possible d'estimer et d'anticiper les systèmes de risques possibles pour un système territorial donné.

2.3.2. Démarche

Compte tenu du caractère statique de la majorité des approches de la vulnérabilité des territoires, du caractère a-spatial des analyses de la dynamique des systèmes de risques et du caractère a-spatial de l'analyse de la vulnérabilité des réseaux, force est de constater que les dynamiques spatiales des systèmes de risques impliquant des défaillances des réseaux restent à l'heure actuelle assez peu explorées.

Dans un souci d'anticipation des impacts indirects et de détection des espaces à enjeux, on s'intéresse à la manière dont le système de risques se réalise et se concrétise, au moment où les différentes vulnérabilités et les systèmes de causalités latents se combinent pour produire un « évènement » ou tout au moins une anormalité. Dans ce contexte, les interdépendances des réseaux et des territoires interviennent aux niveaux de la susceptibilité, la criticité, la résilience et la dépendance, notions qui sont elles-mêmes considérées comme les différents types d'enjeux des espaces dans les systèmes de risques. Cette étape de concrétisation du système de risques, qui fera l'objet d'analyse rétrospective et prospective en partie 2, nécessite au préalable, une réflexion sur la construction du système de risques, les « causes profondes » (Blaikie, 1994) du risque déjà évoquées dans le chapitre 1, et qui le plus souvent n'opèrent pas dans la temporalité évènementielle, mais dans une temporalité plus longue liée au développement des territoires, des réseaux et des sociétés. En effet, si en apparence quelques secondes peuvent suffire à leur déclenchement et à leur diffusion, certains évènements n'ont en réalité pu survenir qu'au terme d'un processus de « maturation » du système de risques.

L'analyse des systèmes de risques peut donc s'envisager dans deux temporalités différentes. D'une part, une analyse de la dynamique de systèmes de risques dans une temporalité longue, avec pour hypothèse que l'évolution structurelle des réseaux et de leurs interdépendances avec les territoires contribuent à transformer la fragilité des territoires et des sociétés. La possibilité d'apparition de nouveaux scénarios catastrophiques dans la trajectoire potentielle des systèmes territoriaux nous interroge alors sur leur capacité à faire émerger de nouvelles forces de désorganisation et d'auto-déstabilisation, forces directement liées à leur organisation spatiale et réticulaire. D'autre part, l'analyse de la dynamique des systèmes de crise est également liée au déclenchement des forces de déstabilisation décrites dans la partie précédente. L'analyse est davantage ciblée sur «l'évènement» dans une dynamique du temps court, la perturbation transforme le système de risques en un système de crise, et l'organisation spatio-réticulaire contribue potentiellement à la diffuser et aggraver ses impacts sur la stabilité et la sûreté des sociétés.

L'enjeu est alors de prendre en compte l'espace et les réseaux techniques, dans une formalisation systémique du risque, mais surtout de prendre en compte le fait que les lieux sont liés, pour mettre en place :

- Une formalisation des interdépendances réseaux – réseaux et réseaux – territoires qui serve de base à une méthode de détection des espaces à enjeux dans les systèmes de risques, en fonction de différents aléas (naturel, technique ou anthropique) et des impacts indirects possibles de l'endommagement des réseaux techniques.
- Une analyse rétrospective et spatiale d'évènements, où les interactions entre les sous-systèmes environnement, espaces et réseaux déclenchent des évènements à risques complexes.
- Développer et appliquer une méthode de construction de scénarios de risques et d'effets dominos basée sur l'analyse des interdépendances territoriales afin de mettre en place une simulation de la diffusion spatiale possible des défaillances en cascades de réseaux pour un territoire donné.

En considérant que les réseaux sont des éléments structurants du territoire et des dynamiques spatiales des systèmes de risques, on se situe dans une perspective où connaître l'organisation des réseaux techniques, leur fragilité, les interdépendances qu'ils entretiennent avec les autres types de réseaux et la dépendance différenciée des territoires qu'ils « alimentent » devra nous permettre de proposer des modèles explicatifs mais aussi des modèles d'anticipation des situations de crises et de leurs diffusions possibles pour une perturbation de départ donnée.

L'analyse rétrospective des évènements à risques n'a pas simplement une portée monographique, il ne s'agit pas de mener une description factuelle et détaillée mais de « réfléchir au caractère spatial des évènements qui peuvent affecter l'espace, c'est-à-dire d'évaluer leur étendue, d'envisager les rapports entre échelle spatiale et échelle temporelle » (EPEES, 2001).

Nous avons déjà noté que dans les systèmes de risques associés aux défaillances des réseaux techniques, il existait une sorte de réciprocité des interactions scalaires, dans le sens où une perturbation locale peut avoir un effet global à l'échelle de l'ensemble du système, tout comme une perturbation globale peut avoir des effets locaux fortement différenciés dans l'espace, notamment en fonction du déclenchement ou du non déclenchement de certains effets indirects locaux (comme une panne électrique globale qui provoque des effets sur l'alimentation en eau de certaines zones seulement). La spatialité de l'évènement, appréhendée au niveau du déclenchement, de la diffusion et de la résorption des effets indirects, doit permettre une meilleure compréhension de la dynamique du système territoire – réseau et de l'organisation spatiale qu'il induit, à la fois dans son rôle de source et de cible du système de risque.

Dans une optique d'anticipation des systèmes de risques, on ne peut prétendre à une forme de certitude sur les effets indirects résultant d'une perturbation initiale. A ce sujet, il s'agit de ne pas négliger que l'intérêt d'un modèle peut aussi être de produire de l'indétermination, nous avons alors recours à « des modèles qui ne sont pas strictement prévisionnels, mais tendent à donner un aperçu des devenirs possibles d'un système en fonction de différents contextes » (Allen, 1991 cité par Sanders, 1992).

Pour reprendre le titre du rapport faisant suite à la tempête de glace de janvier 1998 au Québec, on peut également considérer que les caractéristiques de plusieurs crises récentes

nous imposent d'adopter une stratégie d'anticipation consistant à se préparer « pour affronter l'imprévisible » (Nicolet et al.,1999). Le caractère imprévisible de ces crises peut résider au niveau de leur moment d'émergence, de l'incapacité à évaluer la probabilité de réalisation des différentes situations potentielles découlant de la perturbation initiale (incertitude) voire même de l'incapacité à connaître, *a priori*, l'ensemble de ces situations potentielles (inconnu et incertitude radicale).

En partant de l'hypothèse qu'à partir de légères variations de la perturbation initiale (en intensité, localisation ou durée) et pour un même système territorial, plusieurs séquences d'évènements très différentes sont susceptibles de se réaliser, le déroulement de la crise à partir d'une perturbation donnée est multi-potentiel. Cette multi-potentialité n'est pas anodine sur un plan théorique dans le sens où elle démontre que la vulnérabilité n'est pas la composante passive, certaine et entièrement déterministe dans le fonctionnement d'un système de risque. Comme nous l'avons déjà souligné, l'aléatoire du risque n'est pas qu'au niveau de la perturbation, contrairement à ce que laisse penser la distinction classique entre « l'aléa » comme perturbation externe dont on ne peut prédire avec certitude l'apparition, et la vulnérabilité du territoire souvent considérée comme composante déterministe du risque.

D'autre part, reconnaître le caractère imprévisible des impacts d'un évènement ne signifie pas pour autant que tout est possible ; et même, peut-on penser que, si acquérir des certitudes sur le déroulement d'une crise est impossible, peut-être aurions-nous intérêt à renverser le problème en nous intéressant à ce qui ne va certainement pas se passer : ainsi pourrait-on dire, que pour mieux affronter l'imprévisible, d'impossibles certitudes nous conduisent à rechercher des signes d'impossibilités certaines, et donc concevoir le système de risques en termes de possibilités (Chapitre 3). L'analyse des systèmes de risques, des espaces à enjeux et des effets de réseaux est donc conduit dans une démarche visant à comprendre, mesurer et anticiper des évènements à risques dans un système spatial et temporel aux limites imprécises et incertaines.

Ces méthodes sont appliquées de manière rétrospective aux cas du département du Var et de l'agglomération de Barcelone, et dans une logique d'anticipation et de détection des espaces à enjeux, dans le cas de la ville de Marseille. Les systèmes de risques associés à ces applications peuvent être d'une complexité variable et déclenchés par différents types d'aléas ; dans le cas de Barcelone, l'évènement est initialement une coupure électrique, dans le cas du Var, on considère également les interactions du système territoire-réseau avec les aléas naturels incendies et tempêtes de neige, alors que pour le cas marseillais, les systèmes de risques sont initiés par une inondation.

Progressivement, au fil des exemples proposés, la complexité des méthodes de spatialisation des systèmes de risques s'accroît, en prenant en compte l'incertitude et l'imprécision de manière de plus en plus explicite. Les résultats apparaissent alors plus nuancés, les limites spatiales des systèmes de risques s'estompent et perdent en termes de netteté ce qu'elles gagnent en termes d'exactitude.

Dans le premier cas, à l'échelle de la région PACA, puis plus spécifiquement du département du Var, la spatialisation reste assez simple mais permet d'identifier des liaisons entre, au

moins trois types de défaillances des réseaux (électrique, eau et routier). Dans le cas Barcelonais, la spatialisation de données hétérogènes sur les périmètres affectés par la coupure électrique nous contraint à mettre en place une méthode particulière de traitement de l'information spatiale, plusieurs hypothèses sur la délimitation des bassins de dépendance associés aux territoires électriques sont testées et une attention particulière est attachée à la dimension temporelle de la diffusion et de la résorption du système de risques dans l'Espace.

Conclusion

Ce second chapitre relatif au positionnement, aux fondements et à la démarche générale de notre analyse des systèmes de risques a mis en avant la volonté d'ancrer le système de risque dans les interdépendances des réseaux et des territoires plutôt que le « centrer » uniquement sur le réseau technique.

Cette volonté de mettre en place une approche géographique des systèmes de risques liés aux dysfonctionnements des réseaux nous conduit à considérer la prise en compte explicite de l'Espace comme une voie de progression envisageable dans la connaissance des systèmes de risques liés aux infrastructures de réseaux interdépendantes. Ainsi, le système de risques ne se situe pas seulement au niveau des défaillances des réseaux techniques mais aussi et surtout, au niveau du comportement dynamique des systèmes territoriaux soumis à une perturbation des réseaux techniques.

En outre, bien que les réseaux électriques constituent incontestablement un fil rouge de cette recherche, la thématique de cette thèse reste avant tout les systèmes de risques, les effets des réseaux et les espaces à enjeux. L'intérêt et la pertinence du choix du réseau électrique comme porte d'entrée vers l'analyse des effets dominos et de la vulnérabilité des systèmes territoriaux sont également explicités.

A partir de l'exemple des réseaux électriques, et des fondements théoriques, il est démontré que l'analyse de la vulnérabilité d'un lieu n'a de sens que si elle considère la vulnérabilité des systèmes de lieux dans lesquels ce lieu s'intègre et avec lesquels il entretient des relations d'imbrications, de dépendances ou d'interdépendances de nature et d'intensité variable. C'est donc dans une logique de géographie des interdépendances spatiales que nous aborderons les problématiques d'infrastructures critiques, et plus précisément des espaces à enjeux dans les systèmes de risques, associées à l'endommagement ou au dysfonctionnement des réseaux.

Pour traiter cette problématique principale sur l'intelligibilité et la prévisibilité des dynamiques spatiales des systèmes de risques, nous proposons une formalisation et une méthode de détection autour des concepts de susceptibilité, de criticité, de résilience et de dépendance, regroupée sous l'acronyme SCReD, qui feront l'objet du troisième chapitre.

CHAPITRE 3 : SCRED, DEMARCHE DE DÉTECTION DES ESPACES À ENJEUX, SPATIALISATION APPROXIMATIVE ET POSSIBILISTE DES SYSTÈMES DE RISQUES

Introduction

Dans les systèmes de risques considérés dans cette recherche, la coupure électrique peut occuper plusieurs positions : placée en aval du système de risques, la coupure est déclenchée par une perturbation externe qui va provoquer son endommagement, nous considérerons par exemple, les aléas inondations, tempêtes de neige et incendies.

En amont du système, la coupure électrique peut aussi être à l'origine du déclenchement de l'évènement à risque et provoquer des impacts indirects sur les autres types de réseaux et le fonctionnement des territoires. Les dommages sur les autres réseaux sont alors susceptibles de rétroagir sur le réseau électrique ; par exemple, l'endommagement d'un poste de distribution électrique engendre des dysfonctionnements sur les postes releveurs du réseau d'évacuation des eaux usées, pluviales ou sanitaires, qui réactualisent la susceptibilité du réseau électrique à l'ennoiement de certains postes de transformation et donc la possibilité de création de nouvelles coupures.

Les réseaux considérés sont essentiellement d'ordre technique, réseau électrique (transport et distribution), d'alimentation en eau potable, d'évacuation des eaux, ou encore de télécommunication. Les réseaux de transports interviennent de manière plus secondaire dans l'analyse et sont essentiellement intégrés d'une part, pour leur influence sur la propriété de résilience : l'accessibilité à un équipement électrique ou hydraulique endommagé étant une condition préalable logique de sa remise en état ; d'autre part, pour leur dépendance importante à l'électricité, puisque les coupures électriques ont des impacts à la fois sur les conditions de sécurité et de circulation sur la voirie routière (feux de signalisation, péage ou panneau d'indication) et les voies ferroviaires.

Les défaillances des composantes techniques des territoires sont susceptibles de produire des changements d'état des sous-espaces ; la capacité de propagation induite par l'organisation en réseau, implique que la défaillance locale de certains nœuds peut répandre ses effets à l'échelle de l'ensemble du réseau et donc de l'espace qu'il dessert. Parallèlement à cette capacité de diffusion d'impacts à petite échelle, la défaillance d'une ou plusieurs composantes électriques peut également amorcer un processus de différenciation à échelle très fine des périmètres de coupures électriques, processus déjà observé dans de nombreux évènements de grande ampleur, au sujet desquels on décrit parfois dans la presse, les retours d'expériences ou les récits individuels, d'étonnantes juxtapositions et alternances entre des pâtés de maisons affectés par la coupure alors qu'à quelques mètres, l'alimentation électrique dans d'autres pâtés de maison est maintenue.

La différenciation spatiale entre les zones coupées et non coupées au cours d'une coupure peut donc être très complexe, et comprend plusieurs niveaux d'organisation. Par exemple, lors d'une coupure électrique à l'échelle d'un pays, certaines régions peuvent être déconnectées alors que d'autres sont toujours alimentées en énergie ; dans ces régions coupées, ce ne sont pas nécessairement toutes les villes qui sont coupées ; et même à l'échelle de ces villes coupées, certains quartiers sont coupés alors que d'autres ne le sont pas.

A l'échelle d'un espace fortement urbanisé et donc fortement réticularisé, il ne nous est pas possible de connaître précisément la totalité des scénarios de systèmes de risques associés, en amont et en aval des défaillances en cascades de chacune des composantes électriques (voire de chaque combinaison possible de défaillances initiales), et donc encore moins d'attribuer à chacune de ces alternatives un degré précis de probabilité de réalisation. Ce constat est d'autant plus inévitable si d'une part, on considère que ce territoire est dépendant de niveaux supérieurs, auquel cas, envisager l'ensemble des systèmes de risques pour un territoire, implique également de connaître l'ensemble des scénarios à risques pour l'ensemble des niveaux supérieurs duquel ce territoire dépend. Et d'autre part, que cette différenciation multi-niveau de la diffusion se double également de celle opérant dans sa dynamique de restauration, ce qui implique la variabilité de la durée de la coupure électrique, qui elle-même joue un rôle déterminant pour estimer le niveau de dysfonctionnement territorial et de risque sociétal qu'elle induit.

Les systèmes de risques associés aux défaillances en cascade des réseaux techniques possèdent une forme d'incertitude radicale et plusieurs évènements récents ne sont pas sans rappeler ce que Taleb désigne comme étant des cygnes noirs, « un événement qui présente les trois caractéristiques suivantes : premièrement, il s'agit d'une aberration; de fait il se situe en dehors du cadre de nos attentes ordinaires, car rien, dans le passé, n'indique de façon convaincante qu'il ait des chances de se produire. Deuxièmement, son impact est extrêmement fort. Troisièmement, en dépit de son statut d'aberration, notre nature humaine nous pousse à élaborer après coup, des explications concernant sa survenue, le rendant aussi explicable et prévisible » (Taleb, 2008). Les notions de risques et de probabilités telles qu'elles sont entendues classiquement ne sont alors plus adaptées à l'anticipation et la gestion de ce type d'évènements ni à la détection des espaces à enjeux dans les systèmes de risques (Voiron, 2012).

Le recours à une conception possibiliste plutôt que probabiliste du système de risques est une réponse à ce niveau d'incertitude. Compte tenu de la nature de cette incertitude et de l'indétermination de la variabilité du processus, du caractère imparfait de notre connaissance et de l'imprécision des données dont nous disposons pour les observer, nous pensons alors, qu'il est plus fiable de produire une cartographie approximative et possibiliste, qu'une cartographie précise et probabiliste des systèmes de risques des espaces géographiques. Nous reviendrons sur la prise en compte de l'incertitude et de l'imprécision spatiale tout au long de ce chapitre. Pour le moment, il s'agit de présenter la logique, les finalités et les grandes lignes de la méthode d'estimation SCReD qui sera mise en œuvre dans la seconde section de cette recherche.

3.1. SCReD, PRINCIPES GÉNÉRAUX

Si nous avons justifié sur un plan théorique le recours aux concepts d'espaces à enjeux et la proposition d'articuler susceptibilité, criticité, résilience et dépendance (SCReD) comme propriétés à enjeux des espaces dans les systèmes de risques, il nous reste désormais à montrer que cette formalisation est mobilisable et adaptée à la modélisation spatiale du système de risques. A ce niveau, SCReD se voudrait un cadre formel et méthodologique modulable, pouvant prendre appui sur différents types d'informations géographiques et différentes techniques de modélisations et(ou) de simulations spatiales.

Si ce chapitre présente assez précisément plusieurs protocoles d'analyse spatiale de SCReD mobilisés dans le contexte spécifique de cette recherche, ceux-ci ne constituent pas pour autant l'unique manière d'estimer ces propriétés et il ne fait aucun doute, d'une part, que les « bonnes » techniques de détection des espaces à enjeux et d'anticipation des systèmes de risques, sont en partie tributaires des données disponibles pour les aborder (qui nous le verrons, sont variables selon les évènements, les sources et les territoires analysés) ; et d'autre part, que de nombreuses améliorations peuvent être envisagées à plusieurs niveaux du protocole d'analyse mis en œuvre.

Plusieurs méthodes d'estimation des propriétés à enjeux SCReD dans les systèmes de risques sont donc envisageables notamment selon le type de données disponibles, l'échelle mais aussi selon les finalités spécifiques de l'analyse du système de risques. Par exemple, au niveau de la dépendance, dernier élément de l'articulation SCReD, nous avons surtout raisonné en termes de dépendance sociétale et vitale à l'électricité ou à l'eau, nous focalisant ainsi sur les enjeux humains ; or il est tout à fait envisageable d'orienter l'analyse de la dépendance davantage vers la dépendance des activités économiques, comme l'ont d'ailleurs fait avant nous plusieurs auteurs (Green, 1990, Rose, 1997).

La méthode est essentiellement conçue dans une logique de diagnostic et d'anticipation en deux temps. Dans un premier temps, il s'agit d'identifier les espaces à enjeux des systèmes de risques en fonction de l'organisation spatiale des interdépendances des réseaux techniques et des territoires décrites au chapitre 2. Cette logique de diagnostic peut être mobilisée dans un cadre rétrospectif en analysant différents aspects de la spatialité d'évènements observés dans un territoire ; et dans une logique plus statique de diagnostic spatial des interdépendances entre les territoires et les réseaux.

Dans un second temps, il s'agit d'explorer les systèmes de risques et d'estimer les degrés de possibilités de différents scénarios de risques. Le scénario n'intervient pas uniquement en amont de la recherche, s'il est au départ, une hypothèse, le but n'est pas seulement d'observer les impacts spatiaux incertains de scénarios possiblement impossibles, mais justement de préciser en fonction des causalités spatiales et des interdépendances réticulaires qu'ils impliquent, le degré de possibilité de réalisation de ces scénarios pour un territoire donné. Le scénario n'est donc pas simplement une entrée du modèle qui va justifier différents modes de variabilité des paramètres dynamiques, mais intervient également en sortie, comme un résultat, dans la mesure où la spatialisation permet d'estimer un degré de possibilité selon

l'organisation du territoire et des réseaux. Si l'on considère par exemple, la séquence simple: inondation, impact poste source électrique, impact indirect poste de distribution d'eau potable, aboutissant à une coupure électrique et d'eau pour des enjeux de dépendance (ex : maison de retraite), alors le degré de possibilité du scénario est relatif à :

1. L'absence d'un seul maillon de la chaîne, auquel cas le scénario est impossible ; (Exemple : pas de poste d'eau dans la zone touchée par la panne électrique)
2. Au nombre d'itérations nécessaires à la réalisation de cette chaine d'impacts.
3. Aux degrés de possibilités rattachées à chacune de ces itérations.

3.2. L'ESTIMATION DE LA SUSCEPTIBILITÉ COMME UNE POSSIBILITÉ D'ENDOMMAGEMENT INITIAL

3.2.1. Dans un contexte d'incertitude faible, d'information rétrospective complète et spatialement précise des événements, une susceptibilité probabilisée

En considérant d'un côté, en tant que variable prédictive, une information empirique et rétrospective qui recense la localisation des dommages observés durant une période plus ou moins importante d'un territoire donné ; et de l'autre, comme variable dépendante, les facteurs dont on fait l'hypothèse qu'ils participent au déclenchement de ces dommages, les probabilités conditionnelles constituent une méthode efficace d'estimation de la susceptibilité (Malet, al., 2006). La démarche consiste alors à rechercher la combinaison statistique optimale de facteurs dits de prédisposition, de manière à maximiser leur pouvoir explicatif sur la variabilité spatiale des dommages observés ; puis, après validation (par comparaison à un échantillon d'évènements préalablement retirés du reste de l'analyse), d'en déduire la susceptibilité d'un sous-espace, en fonction des facteurs de prédisposition, hiérarchisés selon les résultats sur la combinaison optimale de ces facteurs à l'échelle globale.

De cette manière, l'analyse spatiale de la susceptibilité peut permettre de détecter : des espaces qui, même s'ils n'ont jamais été touchés par un évènement, peuvent avoir une susceptibilité forte s'ils concentrent de nombreux facteurs de prédisposition. La méthode permet donc de considérer que des évènements à risques peuvent se produire dans des sous-espaces où ils ne sont jamais produits par le passé. Pour être pertinente et robuste, cette méthode d'estimation de la susceptibilité implique plusieurs conditions. D'abord, que l'on dispose de données précises et exhaustives sur les différents dommages observés par le passé ; ensuite, que l'on connaisse et puisse quantifier finement les facteurs qui participent de l'apparition de ces dommages ; enfin, que l'on puisse considérer que les évènements analysés se déclencheront uniquement « dans les mêmes conditions que dans le passé » (Malet, al., 2006).

Cette méthode d'estimation de la susceptibilité est donc adaptée à un contexte d'incertitude faible, rattachée à des phénomènes relativement stables, plutôt simples ou du moins bien déterminés et observés avec précision dans l'espace sur une longue durée, comme peuvent l'être par exemple, les mouvements de terrain. En revanche, elle ne correspond pas aux systèmes de risques qui nous intéressent et sont caractérisés par une incertitude qui dépasse la

simple variabilité et possède souvent à l'échelle du territoire, des dimensions inédites, lors de leurs réalisations. On ne peut donc pas appréhender l'anticipation des systèmes de risques tels que décrits dans les deux premiers chapitres dans ce cadre probabiliste. Compte tenu de cette incertitude, il nous faut envisager une méthode d'estimation de la susceptibilité capable de modéliser de manière plus ouverte et plus réaliste l'incertitude sur les nombreux scénarios initiaux de déclenchements des systèmes de risques tout en intégrant le caractère imparfait des informations dont nous disposons pour les appréhender.

3.2.2. L'indétermination des trajectoires et l'effet de surprise des systèmes de risques.

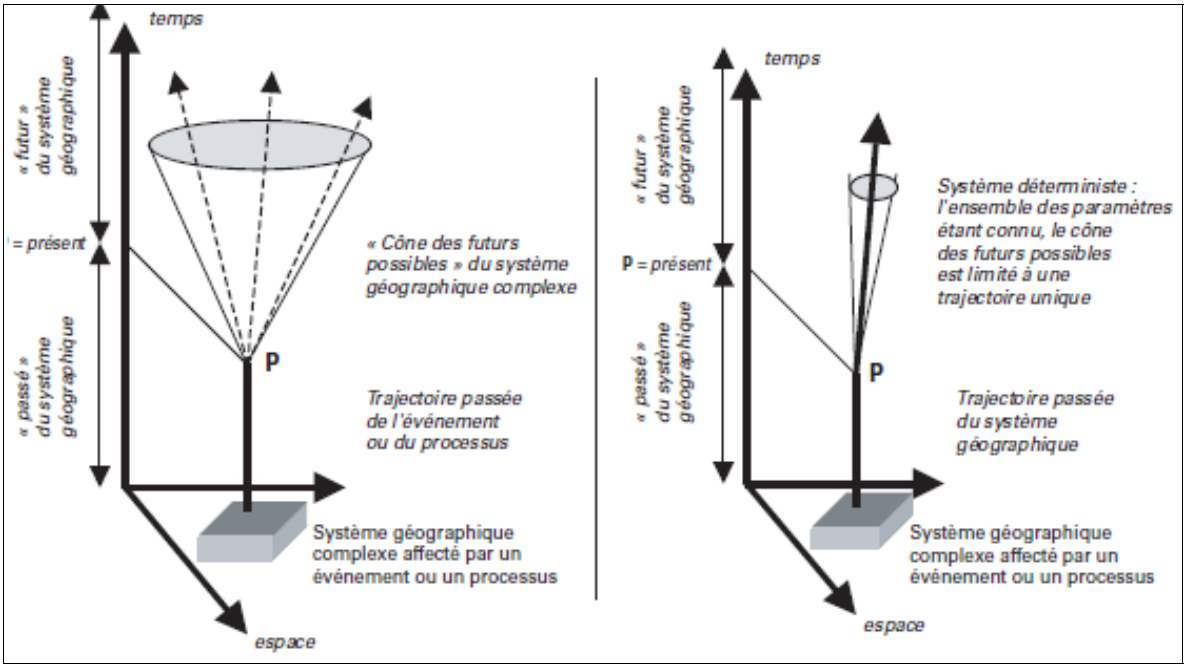


Figure 18 : Concept de cône des futurs possibles d'un système géographique complexe et de trajectoire limitée d'un système géographique complexe (Rolland May, 2001).

La figure 18 nous éclaire sur la différence entre deux contextes de connaissance possible de l'incertitude ; si l'anticipation de certains risques comme les mouvements de terrain peut rentrer dans le cadre des trajectoires limitées de la figure de droite car ils correspondent à « un système géographique dit entièrement déterminé, tout l'incertain quant à ses futurs possibles ayant totalement disparu. » (Rolland May, 2003), cette notion de trajectoire unique n'implique pas de mono-potentialité mais plutôt que l'on connaît l'ensemble des facteurs explicatifs et la plage d'étendue de la variabilité d'un système.

Dans ce contexte, le système exclut l'effet de surprise que nous avions évoqué au premier chapitre. Cette notion d'effet de surprise ne porte pas uniquement sur le moment de réalisation de l'évènement, qui peut être qualifié de « surprise effective » (Shackle, 1967), mais bien, sur notre incapacité à envisager *a posteriori* cette réalité dans son ensemble et donc sur la « surprise potentielle ». Shackle va d'ailleurs plus loin puisqu'il propose de considérer le degré de surprise comme inverse du degré de possibilité d'une situation : « le degré de

surprise que nous éprouvons, au regard d'une éventualité que nous jugeons plus ou moins possible, en général, ou en raison de circonstances d'obstacles, tensions ou difficultés, que nous imaginons, voilà l'indice de degrés de possibilités, il s'agit de la surprise de ce que nous pensons que nous ressentirions, si nous apprenions que la chose était arrivée ; il s'agit d'une surprise potentielle." (Shackle, 1967).

L'anticipation des systèmes de risques liés aux défaillances des réseaux techniques et de leurs impacts spatiaux sort de ce cadre et nous paraît plus proche de la notion de cônes des futurs possibles à gauche sur la figure, et qui sont caractérisés par une forte indétermination et une forte multi-potentialité. Par ailleurs, le fait que les deux trajectoires rétrospectives soient représentées par des simples droites mérite quelques remarques. Même s'il est évident qu'une seule trajectoire rétrospective s'est effectivement réalisée, notre interprétation et notre connaissance de cette trajectoire est en revanche variable, aussi peut-on considérer que cette trajectoire possède une certaine oscillation ou une certaine épaisseur qui elle-même évolue dans le temps. C'est assez évident pour l'incertitude et l'imprécision de notre connaissance des phénomènes sociétaux ou historiques, mais on retrouve aussi cette imprécision dans l'observation de phénomènes purement physiques. Par exemple, l'instrumentation technique existante pour observer les séismes ou les inondations se sophistique, et avec le temps, on peut connaître plus précisément le présent ou/et le passé, qui devient ainsi une trajectoire passé qui se construit plus finement, et peut aussi, dans certains cas, permettre de réduire le cône des futurs possibles.

Il y aurait donc dans notre cas, une distinction à établir entre la trajectoire passée telle qu'elle s'est réalisée, qui serait représentée par une droite, mais aussi cette trajectoire rétrospective telle qu'on la connaît, et qui aux yeux de « l'observateur-constructeur » de cette trajectoire constitue le seul passé qui existe au présent, et donc la seule trajectoire mobilisable dans le cadre d'une modélisation du risque. On pourrait alors parler d'une sorte de cône des passés possibles, dans lequel l'incertitude et l'imprécision seraient de nature différente de celles du cône des futurs possibles.

Cette sophistication technique peut même permettre de connaître plus précisément le passé à des périodes très anciennes : les progrès techniques en télédétection ont par exemple relancé de manière fructueuse l'exploration de plusieurs sites d'implantations de civilisations d'Egypte ancienne en bordure du Nil et permis d'émettre de nouvelles hypothèses notamment sur l'exploitation et l'acheminement des minerais. De la sorte, ils contribuent à réduire notre méconnaissance sur la trajectoire passée de ces territoires, tout en augmentant le niveau d'incertitude puisqu'il s'agit simplement d'émettre de nouvelles hypothèses, et non de valider ou d'en réfuter d'autres. Il faut donc souligner l'absence de relation positive entre l'avancée des connaissances et l'avancée des certitudes, puisque, comme nous l'avons vu, un progrès dans la connaissance peut permettre d'émettre de nouvelles hypothèses et donc augmenter l'incertitude en créant une nouvelle trajectoire possible du système (que cette trajectoire soit rétrospective ou prospective). En montrant qu'une autre alternative de trajectoires du système est possible (passé ou futur), sans que cela n'annule la possibilité des autres, une nouvelle connaissance contribue à augmenter l'incertitude d'une trajectoire tout en permettant de la connaître avec plus de précision et de réalisme.

Nous rejoignons alors une posture qui tient plutôt du scepticisme vis-à-vis de la connaissance possible et l'anticipation de certains systèmes. Dans la mesure, où nous ne sommes pas en mesure de connaître parfaitement tout le passé, le présent et le futur de leurs trajectoires, il existe des progrès dans la connaissance de ces systèmes qui reposent sur la proposition de nouvelles hypothèses, sans que celle-ci n'en valide ou n'en annule d'autres. L'augmentation du cône d'incertitude d'une trajectoire peut alors assez paradoxalement être considérée comme une connaissance plus précise et plus exacte de cette trajectoire. On retrouve l'essence de ce principe dans plusieurs formules célèbres, chez Socrate, « tout ce que je sais, c'est que je ne sais rien. », ou encore des proverbes plus usuels « plus je sais, moins j'en sais. », ou le courage sceptique, considérant qu'il est peut-être plus facile de vivre borné dans nos certitudes, qu'admettre que tout est relatif.

3.2.3. Le statut scientifique des connaissances et des méthodes approximatives

La place de l'incertitude et plus largement du doute dans le domaine des sciences et de la vérité, est une question épistémologique de fond, prise en compte et théorisée par plusieurs courants de pensée. Dans l'histoire des sciences, des postures variées ont été adoptées vis-à-vis de l'incertitude. Généralement ces postures découlent de conceptions différentes de la vérité et de la science. Pour les dogmatiques, les vérités scientifiques sont conçues comme certaines et absolues, qu'elles soient démontrées par un raisonnement, un calcul ou bien le résultat de l'évidence. Même chez Descartes le doute méthodologique n'est qu'une étape pour fonder des certitudes puisqu'il faut « se fier seulement à ce qui est parfaitement connu, et dont on ne peut douter ». A l'autre extrême, chez les sceptiques radicaux, les incertitudes portent non seulement sur la capacité à établir des certitudes mais également sur l'existence du monde, de soi et des sens. Un reproche récurent adressé aux sceptiques porte alors sur le fait qu'admettre et se tenir à une reconnaissance de l'incertitude absolue peut devenir rapidement une limite paralysante pour la pensée et conduire à renoncer à la recherche de la vérité, de l'opinion et de l'action.

Plus proche de nous, dans l'épistémologie de Popper, la connaissance prise pour vraie est par nature incertaine, puisque réfutable et provisoire. Les vérités sont alors biodégradables (E. Morin, 1984), elles ne sont que les théories les moins fausses du moment et seront amenées à être remplacées par d'autres théories un peu moins fausses ; ou du moins, mieux adaptées pour rendre intelligible un objet d'étude. L'incertitude est donc reconnue comme inhérente à la connaissance. La révolution quantique, en installant le statut de l'indétermination et du hasard dans la science, renforce l'idée que le projet de la science ne peut pas seulement être de produire de la certitude mais peut aussi être de générer de nouvelles incertitudes (passer de l'inconnu à l'incertain), les explorer (pour réduire l'incertain) et les gérer (pour anticiper et agir dans l'incertain).

Dans cette logique, Lorenz considérait par exemple qu'« étant donné une connaissance approximative des conditions initiales et une compréhension des lois de la nature, on peut déterminer le comportement approximatif du système ». On est donc loin du point de vue dogmatique, considérant que n'est objet de science que ce qui est certain et parfaitement connu. Cette reconnaissance d'un statut scientifique de l'approximatif, de l'incertain et de

l'imprécision n'est pas à lire comme un aveu de faiblesse ou une paresse intellectuelle mais comme un progrès, et même pour certains, comme un changement de paradigme.

A titre exceptionnel, une petite parenthèse plus personnelle : une difficulté importante rencontrée dans la conduite de cette recherche vient du fait qu'elle porte sur l'anticipation d'un phénomène extrêmement incertain, tout en incluant d'un point de vue thématique un domaine compliqué dont je ne connaissais strictement rien au départ (l'électrique, les réseaux techniques, leur emprise spatiale, leurs fonctionnements..) Tout au long de la recherche, l'incertitude a été difficile à délimiter parce qu'au fond elle me renvoyait à une crainte et peut être même, à un complexe de ma propre méconnaissance de certaines dimensions techniques de l'objet d'étude. Distinguer la méconnaissance, de l'incertitude ; l'inconnu, de l'inconnaissable ; ce qui est à connaître de ce qui est négligeable, est éprouvant, décourageant, pour peu que l'honnêteté intellectuelle nous pousse d'abord à chercher à connaître avant de reconnaître l'incertain ; pour autant, cette volonté de connaître peut aussi laisser place à une forme d'entêtement, si ce n'est d'acharnement à vouloir expliquer l'inexplicable et prévoir l'imprévisible ; ainsi, en niant l'incertitude, ce peut aussi être notre peur de mal connaître qui s'exprime et nous empêche de connaître.

3.2.4. Dans un contexte d'incertitude forte et d'imprécision spatiale, une susceptibilité « possibilisée » et des systèmes de risques flous dans des espaces flous

3.2.4.1. Distinctions entre l'imprécision spatiale et l'incertitude dans SCReD

Comme nous l'avons souligné, l'impossibilité de connaître précisément la totalité des facteurs possibles d'endommagement, des impacts possibles et l'absence de référentiel rétrospectif fiable pour appréhender ces systèmes de risques constitue une difficulté méthodologique importante et nous empêche d'avoir recours à certains types de méthodes qui contribueraient à « surdéterminer » le système de risques. De plus, compte tenu du caractère assez émergent des systèmes de risques, les informations spatiales sur la description des zones de coupures et de leurs impacts à des échelles régionales ou urbaines sont particulièrement lacunaires, dispersées et hétérogènes ce qui nous impose d'avoir recours à des informations parfois qualitatives, atypiques, ou même imprécises en terme de délimitation des lieux désignés, des périodes désignées ou d'intensité des phénomènes. Ce recours à des informations originales et parfois imprécises n'est pas antinomique avec une volonté de quantifier le risque et on peut même considérer que dans une démarche de construction d'indicateurs spatialisés sur le risque, « nous avons besoin de deux types d'indicateurs complémentaires : des "poteaux indicateurs" donnant des informations quantitatives, relativement sûres, robustes et des "indics" pour obtenir des informations furtives, cachées, mais également (si ce n'est plus) performantes» (Arnould et al. 2004).

Dans la démarche, l'incertitude et l'imprécision spatiale interviennent de deux manières bien distinctes qu'il convient de préciser. Dans le cadre rétrospectif, nous traitons principalement de l'imprécision spatiale et elle est avant tout reliée aux enjeux de fusions de données de nature, de précision et de fiabilité disparates portant sur les zones, la durée et les impacts des évènements passés. Dans le cadre de la détection des espaces à enjeux et l'exploration des

possibilités des systèmes de risques, elle est davantage liée à l'incertitude et porte sur les possibilités d'endommagement des nœuds de réseaux pour une perturbation d'une intensité donnée, sur les degrés des interdépendances entre les réseaux ou encore sur les impacts sociétaux d'une coupure électrique d'une durée définie. L'imprécision spatiale intervient également dans un cadre assez particulier dans la délimitation des aires de dépendances spatiales associées aux nœuds des réseaux techniques. Il s'agit alors d'intégrer une forme de variabilité temporelle, d'incertitude spatiale et de méconnaissance dans la délimitation spatiale des aires de dépendances associées aux nœuds des réseaux, en considérant ces limites spatiales induites par les réseaux comme étant celles d'un espace flou.

Ces enjeux interviennent donc en fait à trois niveaux de notre démarche :

- Imprécision spatiale en entrée du modèle de détection des espaces à enjeux.
- Imprécision spatiale et incertitude au cœur du modèle.
- Incertitude spatiale en sortie du modèle d'anticipation.

L'imprécision est intégrée à la fois comme une contrainte des données d'entrée, mais également comme une réponse possible pour la définition de limites qu'on ne parvient pas à connaître précisément mais dont on ne nie pourtant pas qu'elles possèdent une existence précise. On retrouve à ce sujet une distinction importante entre deux types de limites spatiales floues (Rolland May, 2001), les premières qui seraient floues par nature, par exemple, une frontière linguistique ou une aire d'attraction commerciale, et les secondes qui seraient les limites floues comme méthode de spatialisation du fait de l'incertitude sur la spatialité des phénomènes ou l'imprécision des données.

Dans une logique d'anticipation, l'espace à risque pourrait se voir comme un espace dont les limites sont floues de nature, alors que dans une logique rétrospective, la référence au flou et à l'approximation serait davantage liée à l'imprécision des données et à notre connaissance incertaine du déroulement des évènements (on peut alors penser qu'elle serait peut-être davantage réductible).

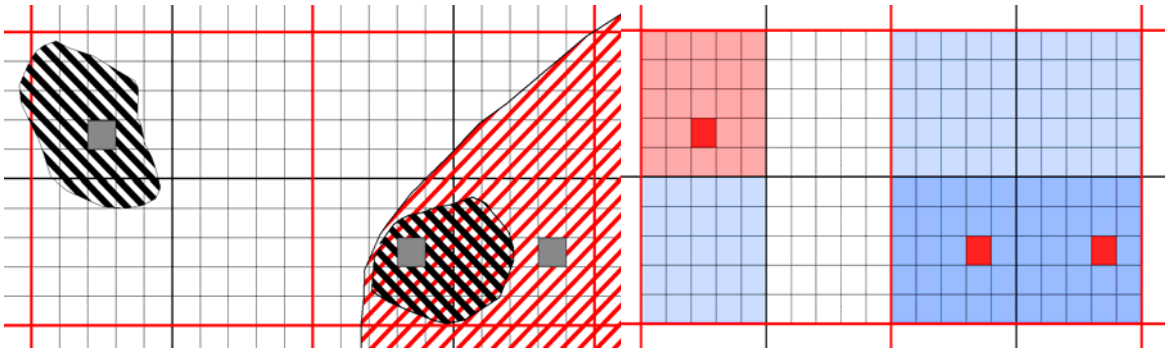
3.2.4.2. Méthode d'estimation de la susceptibilité et traitement de l'imprécision spatiale.

La méthode d'estimation de la susceptibilité proposée s'appuie sur l'estimation d'un potentiel impactant cellulaire. Son estimation repose sur la matérialité du territoire, croisée aux informations spatiales sur la perturbation susceptible de provoquer l'endommagement initial ; chaque sous-espace est considéré comme un système autonome et aucune forme d'interaction (ni par connexité, ni par contigüité) avec d'autres sous-espaces ne possède la moindre influence sur son propre potentiel impacté. Il s'agit dans un premier temps de construire une estimation du niveau de risque d'impact à partir de données issues de sources diverses dont l'incertitude et l'imprécision sur un plan spatial et factuel peuvent être variables. Ce niveau de risque est calculé en fonction de la connaissance empirique et déterministe portant sur les sites propices à l'apparition de l'aléa analysé. Son estimation doit permettre, en étant croisée au potentiel impactant cellulaire, de caractériser la répartition spatiale la plus probable de points de déclenchements du système de risque.

Dans cet exemple, ces points de déclenchements correspondent à des endommagements directs de postes électriques par un aléa naturel. Les données spatialisables sur l'aléa peuvent être considérées comme imbriquées dans la mesure où, selon les évènements recensés, et leurs sources (retour d'expérience, données SIG, résultat de modélisation, témoignages, dires d'expert ou presses), seront combinées des données dont la précision et la qualité spatiale vont varier de très faible (impact à l'échelle d'un quartier, ou d'une zone floue par exemple) à très fiable, voire même parfaitement spatialisées (à l'adresse ou à la rue). Cette forte variabilité des niveaux de précision spatiale et de certitude va conduire à rattacher chaque information sur une situation localisée à un seul et unique niveau de granulométrie spécifiquement prédéfini (figure 19).

Au total, trois niveaux de granulométrie ordonnés par taille croissante sont pris en compte sous forme d'emboîtements successifs de maillages carrés et de tailles croissantes (100 mètres de côté, 500 mètres de côté et 1000 mètres de côté), ils combinent à eux trois, l'ensemble des informations spatiales sur le risque. Evidemment, la taille des mailles peut être réajustée dans un sens ou dans l'autre, selon l'échelle du phénomène observé et la granulométrie des données disponibles et pertinentes pour son analyse. L'unique contrainte est que ces mailles soient imbriquées et correspondent à un emboîtement d'échelle parfaitement concordant. Ainsi, une information de mauvaise précision spatiale concernant un aléa naturel et les dommages afférents comme on peut parfois en trouver dans la presse par exemple, sera affectée à un maillage de 1000 mètres de côté.

La part de surface occupée dans chacune des cellules de 1000 mètres par le périmètre à risque approximativement délimité est ainsi calculée de manière à obtenir une valeur nécessairement comprise entre 0 et 100. Pour chaque maille de 1000 mètres, le résultat obtenu va être ensuite divisé par 100 et reporté à toutes les cellules de 100 mètres qui en dépendent. De la même manière, les informations de précision spatiale moyenne (témoignages, zonages ou résultats de simulation avec forte incertitude spatiale par exemple) vont être analysées en fonction de leur occupation des mailles de 500, puis les résultats seront divisés par 25 et reportés aux 25 cellules de 100 mètres imbriquées dans chaque maille de 500. Pour le traitement des données de forte précision spatiale rattachées aux cellules de 100 mètres, l'intégralité de la surface est considérée comme occupée du moment qu'il y a une donnée précise référencée.



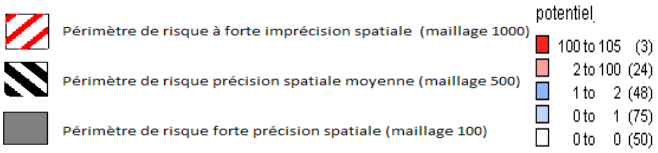


Figure 19 : Imbrication et variabilité de l'imprécision spatiale dans la connaissance de l'aléa (19a) et estimation du niveau de risque d'impact (19b).

Les résultats du maillage 100 sur le niveau de risque d'impact, présentés en figure 20 contiennent ainsi les informations issues de différentes sources à trois niveaux de granulométrie avec un traitement de l'imprécision spatiale qui fait émerger une image originale du potentiel impacté du système spatial composé entre autres de :

- « points saillants » (niveau de risque d'impact supérieur à 100) qui sont des sous-espaces dont le potentiel impacté est considéré comme important car les dommages recensés sont mentionnés par plusieurs sources, pour plusieurs évènements et pour plusieurs niveaux de granulométrie. Il existe à ce niveau une possibilité forte pour que cette cellule contienne un point de déclenchement du système de risques.
- « zones floues » (niveau de risque d'impact compris entre 0.001 et 1) pour lesquelles l'impact est plausible mais assez incertain et qui sont en fait des mailles 500 ou 1000, faiblement occupées par les périmètres de risque, et pour lesquelles on recense des dommages qui ne sont confirmés à aucune échelle inférieure.
- « zones blanches » (niveau de risque égal à 0) où aucun dommage n'est recensé par une approche empirique ou déterministe, ni pour la maille 50, ni pour les mailles de granulométrie supérieure auxquelles elle appartient. Le risque pouvant alors être considéré comme relativement improbable.

Pour bien comprendre l'intérêt de cette démarche, prenons un exemple d'application rétrospective à l'échelle d'un évènement et imaginons que nous souhaitions cartographier la délimitation d'une coupure électrique en spatialisant les informations contenues dans un article de journal. L'article de journal titre par exemple « panne électrique géante à Nice » puis mentionne de manière non exhaustive certains quartiers et certains sites précis comme un hôpital, un stade de football, où la coupure a eu des impacts importants du fait de sa durée, et mentionne également certaines zones de la ville où il n'y a pas eu de coupures électriques. Il y a alors plusieurs manières d'envisager la fusion des informations de niveaux de précision et de généralisation spatiales différentes.

On peut considérer qu'il existe un caractère paradoxal entre certaines informations : par exemple l'information « pas de panne électrique dans la partie Ouest de Nice » contredit partiellement l'information « panne électrique à Nice ». Si, en la considérant comme erronée, on choisit d'éliminer systématiquement l'information spatialement imprécise contredite par une information spatialement plus précise, le risque est de se retrouver au final avec des points précisément informés mais en très petit nombre. En termes d'information, on gagne alors en précision spatiale mais on perd peut être davantage en terme de complétude. Inversement, si on choisit de considérer strictement de la même manière les informations des différents niveaux de précision spatiale, alors le risque est de dégrader la qualité générale de l'information, de considérer comme contradictoires des informations qui témoignent en fait de

différenciation spatiale fine, et de ne pas optimiser la précision spatiale de certaines données qui sont pourtant les seules susceptibles de faire apparaître des différenciations spatiales à échelle fine.

Si on revient à la méthode d'estimation de la susceptibilité, une fois mesuré l'impact potentiel initial, le potentiel impactant cellulaire se mesure ensuite en fonction de la densité de postes de transformation électrique par sous-espace, tout niveau de tension confondu puisque le potentiel impactant cellulaire ne considère que la matérialité du territoire, croisée au niveau de risque d'impact estimé précédemment. Il doit mettre en exergue les espaces qui ont plus de chance de contenir des points de déclenchement du système de risque. Ainsi, une cellule ne comportant aucun poste électrique aura un potentiel impactant cellulaire égal à zéro, de même que les cellules qui ont un risque d'impact à zéro. Ces sous-espaces ne peuvent être impactants en termes de dommage électrique. A l'inverse, pour un niveau de risque d'impact identique, un sous-espace avec beaucoup de postes électriques a plus de chance d'être un site de réalisation de l'évènement déclencheur « endommagement d'un poste électrique ». Dans l'exemple suivant, l'ensemble des données a été agrégé au niveau le plus fin mais il est également possible de réaliser ces croisements à partir des autres niveaux.

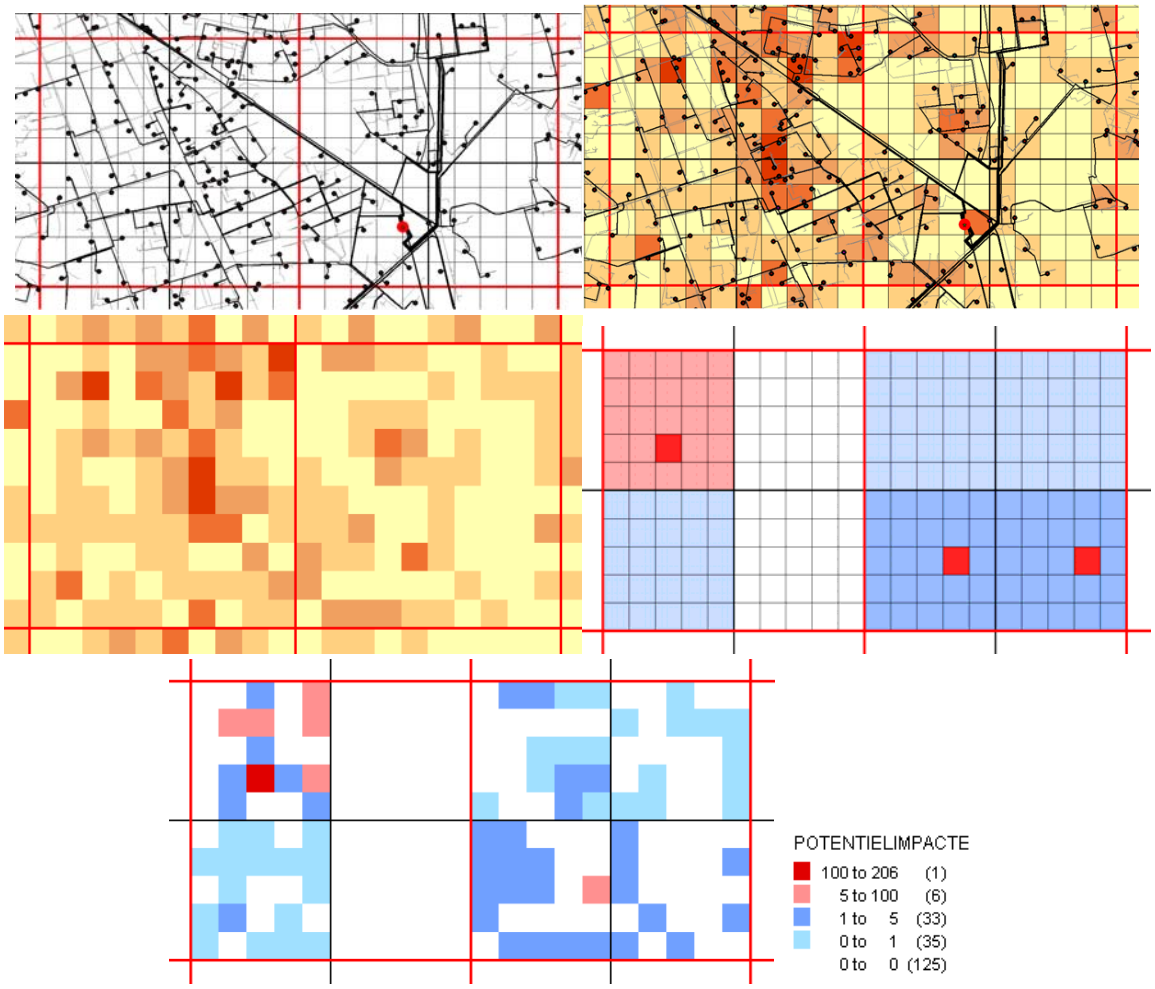


Figure 20 : Croisement des données sur la densité de nœuds du réseau avec les données sur la perturbation obtenue en figure 19.

3.2.4.3. Méthode d'estimation de la susceptibilité et traitement de l'incertitude forte

De par sa logique imbriquée, on comprend assez facilement comment la méthode permet de traiter la problématique liée à l'imprécision spatiale en entrée de SCReD dans le cadre de la spatialisation de données sur les dommages observés lors d'évènements passés. Pour comprendre son intérêt face à un haut degré d'incertitude sur la connaissance des systèmes de risques, nous avons souligné précédemment que nous avions besoin d'envisager des méthodes plus ouvertes que le cadre des probabilités.

Cette notion d'ouverture peut aussi être introduite dans l'estimation de la susceptibilité en faisant le choix d'intégrer, malgré l'impossibilité de les connaître précisément, puisque le système est partiellement indéterminé, certains facteurs de prédisposition au déclenchement des systèmes de risques dont on assume par ailleurs ne pas connaître précisément l'ensemble des composantes et des relations possibles. Par exemple, pour estimer la susceptibilité des postes électriques à l'ennoiement, nous considèrerons en plus de données sur les évènements historiques, certains facteurs de prédispositions, dont on ne peut pas évaluer avec précision et certitude l'influence sur la possibilité d'impact, mais qui, par contre, peuvent être précisément délimités dans l'espace. Typiquement, la détection des postes implantés dans des minimas locaux de la topographie est menée sur des cellules de 10 mètres de côté, (elle est donc relativement précise en termes de précision spatiale, en revanche elle reste imprécise en termes de la possibilité d'impact qu'elle implique). Dans un cadre probabiliste, on pourrait difficilement admettre cette prise en compte non différenciée de données observées et de facteurs incertains.

Dans un cadre possibiliste, la démarche nous paraît envisageable sous certaines conditions et certains prétraitements que nous préciserons au cours des applications. La difficulté vient alors du fait que l'ouverture du champ des possibles implique d'intégrer de nouveaux facteurs, sans pour autant que ces derniers puissent impliquer des conditions que l'on sait non suffisantes (par exemple un minimum local dans lequel il n'y aurait pas de postes électriques ne peut pas déclencher le système de risques). La difficulté tient aussi à un équilibre à trouver entre l'ouverture du champ des possibles en intégrant des facteurs dont on ne connaît qu'avec imprécision l'effet sur le système, sans pour autant en arriver à dire que tout est possible partout. Si l'intégration de facteurs incertains peut contribuer à améliorer la compréhension des trajectoires passées ou futures des systèmes territoriaux en proposant de nouvelles alternatives possibles, il peut aussi les rendre impossibles à envisager si tout devient possible.

D'autres méthodes peuvent également permettre d'envisager de manière plus ouverte l'endommagement possible des postes électriques. Par exemple, nous avons présenté dans le chapitre 2, la méthode de construction des courbes de dommages probabilistes à partir de données observées sur les endommagements des postes électriques, lors du séisme de North Ridge (Shinozuka, 1998). Le cadre des possibilités peut permettre d'envisager autrement la mesure de l'incertitude quant à ces endommagements.
Dans le cadre de la théorie des probabilités traditionnelles (Px), la somme des probabilités d'un évènement est nécessairement égale à 1 et toutes les alternatives doivent être connues et chiffrées. La probabilité d'apparition d'un évènement n'est pas une valeur intrinsèque de son

incertitude mais une valeur relative à la probabilité d'apparition des autres évènements. Dans le cadre de la théorie des possibilités, on considère que la réalisation d'un évènement n'influe pas sur la possibilité de réalisation des autres chaines de dommages. La possibilité est une valeur intrinsèque de l'évènement et n'est pas relative à la possibilité des autres évènements. De ce fait, il n'est pas indispensable de connaître l'ensemble des alternatives possibles pour évaluer la possibilité d'un évènement et la somme des possibilités de l'ensemble des évènements (π x) n'est généralement pas égale à 1. L'exemple choisi par Zadeh pour illustrer la différence entre ces deux logiques est volontairement trivial et simple, pourtant, il permet de comprendre de manière presque intuitive la logique de la théorie des possibilités. Le tableau de données « Hans et ses œufs au petit déjeuner » ne repose pas sur une expérience étrange ou sur des données empiriques solides mais des valeurs fictives et sur une simple assertion de départ : « Hans mange X œufs pour le petit déjeuner ». La question est alors de savoir comment évaluer l'incertitude de X ?

NOMBRE D'ŒUFS	1	2	3	4	5	6	7	8
POSSIBILITE π x (u)	1	1	1	1	0,8	0,6	0,4	0,2
PROBABILITE P x (u)	0,1	0,8	0,1	0	0	0	0	0

Figure 21 : Logique de possibilités et de probabilités, l'exemple des œufs au petit déjeuner (Source Zadeh, 1978).

Zadeh souligne plusieurs points :

- Un degré de possibilité élevé n'implique pas nécessairement un degré de probabilité élevé, comme le montre l'exemple X = 3.
- Un degré de probabilité faible n'implique pas nécessairement un degré de possibilité faible, comme le montre l'exemple X = 3.
- Si un évènement est impossible, on peut supposer qu'il doit être improbable.

On voit également que certains évènements improbables (c'est-à-dire en dehors du cône des futurs envisagés dans le cadre des modèles généraux de l'incertitude), apparaissent comme des réalités fortement possibles (X=4). La théorie des possibilités permet donc d'envisager un nombre d'alternatives plus ouvert du fait, notamment, de la non influence entre les degrés d'apparition des différents évènements. En plus des situations habituelles, elle permet de prendre en compte les matinées plus inhabituelles, en dehors du cadre de vie habituel de Hans, ces jours où par exemple, Hans n'aura exceptionnellement pas mangé au diner de la veille et aura très faim le lendemain matin (X =5 à 8), jours qui peuvent être rares, non observés empiriquement et pourtant possibles exceptionnellement. Laissons Hans à son petit déjeuner et revenons-en aux systèmes de risques.

A partir de la logique de l'exemple de (Zadeh, 1978) visant simplement à illustrer la différence entre logique possibiliste et logique probabiliste, nous avons envisagé le cas de l'endommagement des postes électriques face aux perturbations sismiques à partir des

données sur le séisme de North Ridge. Il ne s'agit à ce stade que d'un exemple dont le but est de montrer que la logique possibiliste permet d'envisager de manière originale et pertinente l'exploration des incertitudes de la susceptibilité des sous-espaces et des réseaux dans les systèmes de risques. Contrairement aux cas de Zadeh, où la somme des probabilités est égale à 1, les probabilités extraites de la courbe de fragilités de Shinozuka sont conditionnelles, elles répondent à la question : si la perturbation (U) vaut (x) alors, quelle est la probabilité (y) pour qu'un poste électrique subisse un dommage ? De fait l'ensemble des alternatives n'est pas égale à 1.

Dans ce contexte de probabilités, l'incertitude des dommages est relative à l'ensemble des dommages observés pour l'ensemble des valeurs de PGA et conduit à des résultats différents de ceux d'une approche fondée sur une logique de possibilités. Par exemple, dans un cadre probabiliste les dommages pour un PGA de 0.2 sont extrêmement faibles et tiennent du domaine de l'improbable (figure 23). Pourtant si on regarde les dommages observés (les points sur les axes de la figure), on voit que pour les quelques cas où le PGA a été inférieur à 0.2, nous avons un cas où il y a eu dommage et un autre où il n'y en a pas eu. De fait, même si le dommage est improbable (P (0.2) = 0.03) compte tenu du comportement des autres postes face à d'autres niveaux de perturbations, l'incertitude du dommage pour ce niveau de perturbation en termes de possibilité nous paraît devoir être supérieure (0.3). D'autre part, on constate à partir des données observées que pour l'ensemble des cas où le PGA est supérieur à 0.5, cela se traduit systématiquement par un endommagement. Ainsi, même si une nouvelle fois, compte tenu du comportement des autres postes face à d'autres niveaux de perturbations, les probabilités estiment l'incertitude de manière variable, la logique de possibilités nous conduit à considérer ces évènements comme un noyau de possibilité. A partir d'un niveau de PGA 0.5, le dommage est très fortement possible.

La coupe à un degré de 0.6 de possibilité sur la figure 24, indique que pour une perturbation initiale, comprise entre un PGA de 0.3 et un PGA de 1.2, les dommages sont moyennement possibles. Dans un sens vertical, si l'on considère par exemple une coupe à un niveau de PGA de 0.3, l'endommagement correspond à un degré de possibilité de 0.5. On voit donc que la fonction d'appartenance est conçue comme une valeur précise. On parle de flou de type 1. Plusieurs applications récentes sur ce qu'on appelle le flou de type 2 (Zadeh, 1978) donnent des résultats encourageants dans le traitement des incertitudes et notamment en analyse spatiale (Fisher, 2007).

Cette logique considère que le flou sur les valeurs de références doit se doubler également du flou des valeurs d'appartenance et qu'il est paradoxal qu'une méthode dite floue en arrive à déduire une valeur d'appartenance parfaitement précise comme c'est le cas dans le flou de type 1. Dans la logique du flou de type 2, on parle alors d'empreinte de l'incertitude (Mendel, 2004). Pour introduire ce second niveau de flou dans notre cas (figure 25), on considère par exemple que la valeur de PGA est un indicateur qui ne reflète que partiellement l'intensité des forces physiques exercées par le phénomène sismique sur l'équipement électrique et qu'il existe donc une imprécision supplémentaire sur cette valeur (qui n'est d'ailleurs pas de l'imprécision au sens strict mais plutôt de l'incertitude sur la mesure puisque la valeur de PGA en tant que mesure peut être connue précisément). De plus, ce flou supplémentaire n'est

pas régulier selon la valeur de PGA, et va par exemple mieux qualifier les valeurs extrêmes que les valeurs moyennes.

Figure 22 : Logiques de probabilités et de possibilités appliquées à l'incertitude d'endommagement d'un

U (Perturbation) en PGA (g/d)	**0.1**	**0.2**	**0.3**	**0.4**	**0.5**	**0,60**
Probabilités P d'endommagement	0	0.03	0.25	0.4	0.6	0.75
Possibilités $\pi 1$ d'endommagement FLOU de type 1	0.1	0.3	0.5	0.8	1	1
Possibilités $\pi 2$ d'endommagement FLOU de type 2	[0 - 0,2]	[0 - 0,4	[0,2 - 0,6	[0,4 - 0,9	[0,55 - 0,1	[0,6 – 1]

U (Perturbation) en PGA (g/d) (Suite)	**0,70**	**0,80**	**0,90**	**1,00**	**1,10**	**1,20**	**1,30**	**1,40**
Probabilités P d'endommagement	0.82	0.9	0.95	0.98	1	1	1	1
Possibilités $\pi 1$ d'endommagement FLOU T1	1	1	1	1	1	1	1	1
Possibilités $\pi 2$ d'endommagement FLOU T2	[0,7 – 1]	[0,73 – 1]	[0,75 – 1]	[0,77 à 1]	[0, 79 – 1]	[0,8 - 1]	[0,83 - 1]	[0,88 – 1]

équipement électrique face à une perturbation sismique.

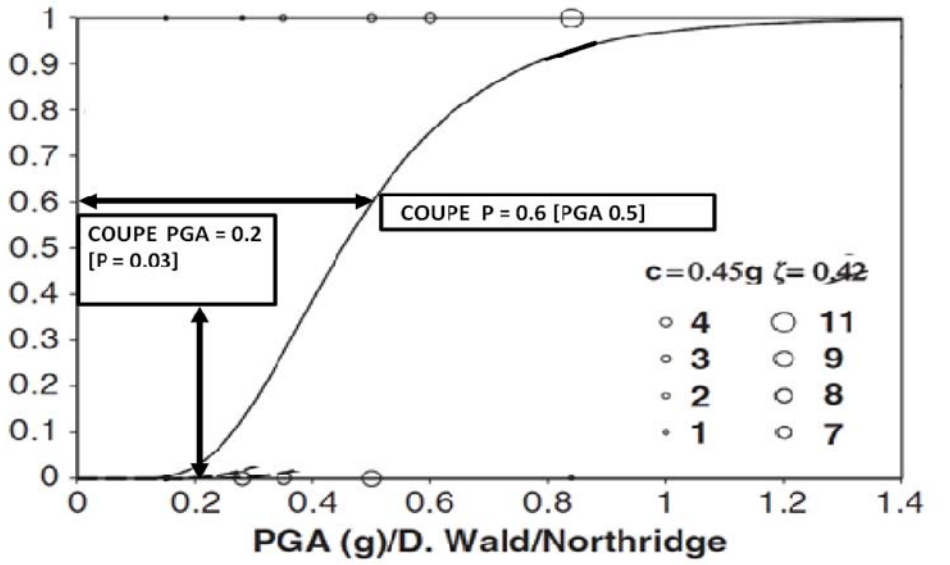


Figure 23 : Courbe de probabilités de dommages obtenues à partir des observations du séisme de Northridge.

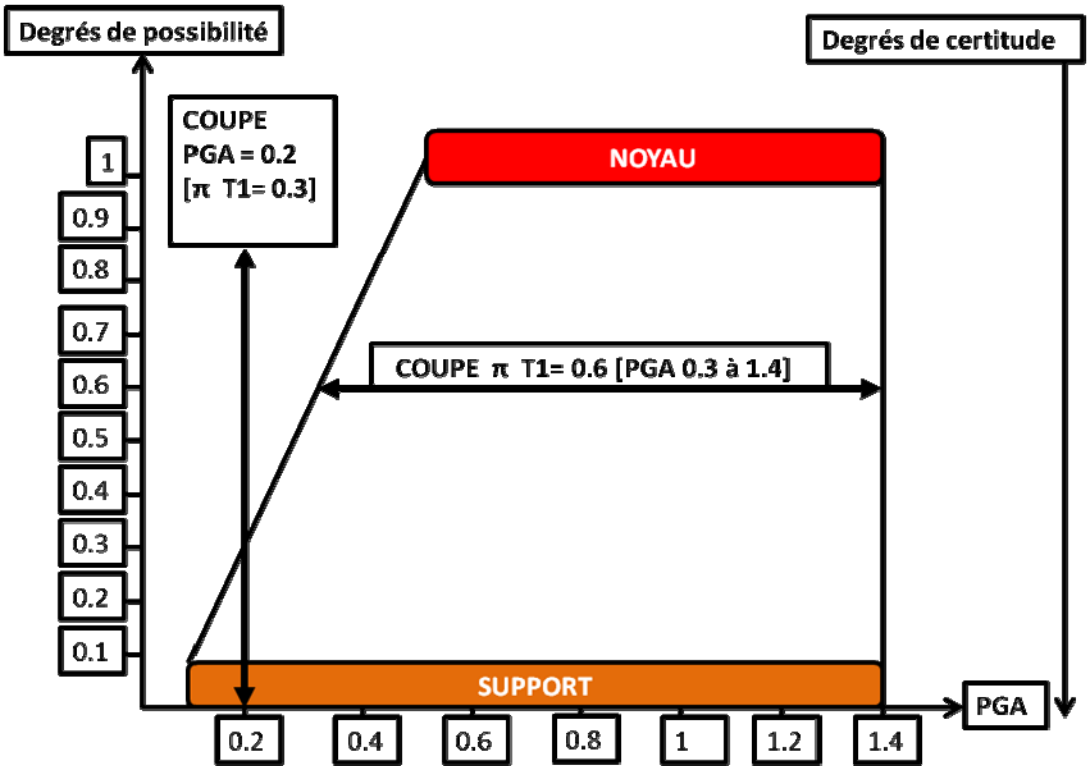


Figure 24 : Estimation de l'incertitude de l'endommagement dans une logique possibiliste.

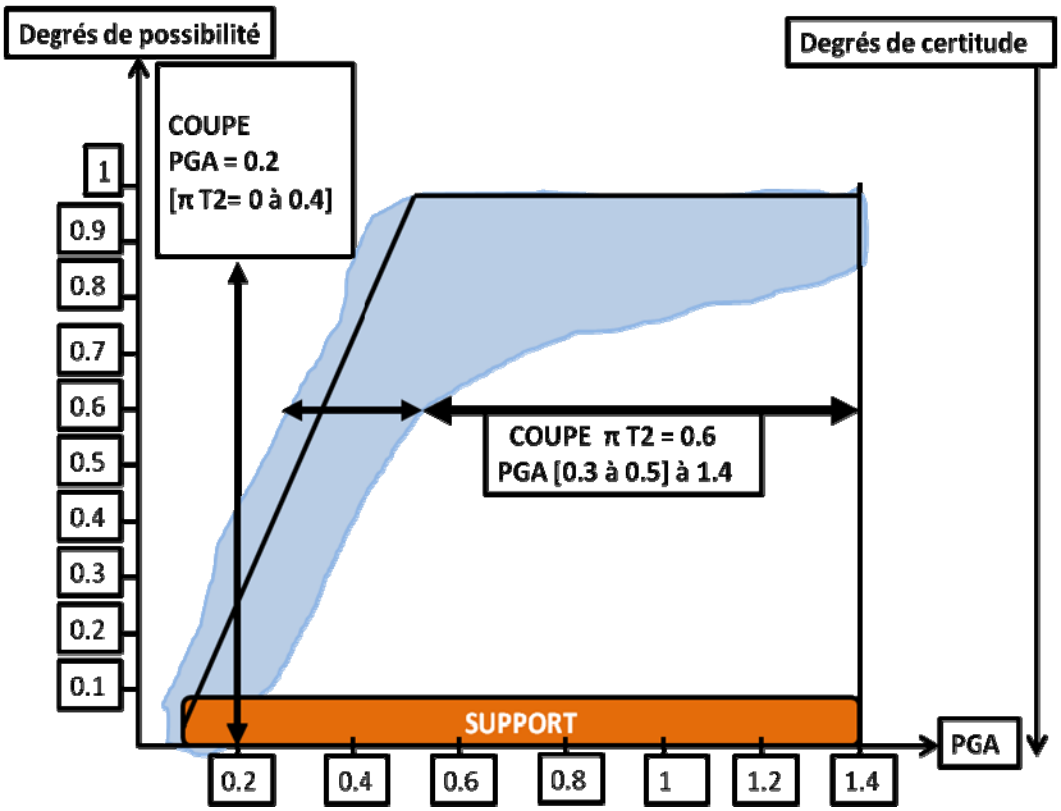


Figure 25 : Estimation de l'incertitude de l'endommagement dans une logique possibiliste avec introduction d'un niveau d'imprécision supplémentaire (flou de type 2).

Il faut bien distinguer deux étapes différentes dans l'enchaînement des figures précédentes.
Le passage de la figure 23 à la figure 24 est le passage d'un cadre probabiliste à un cadre possibiliste ; Il est à remarquer que pour l'ensemble des niveaux de PGA inférieurs à 1, le degré de possibilité d'endommagement est supérieur à son degré de probabilité, Zadeh parle au sujet de ce rapport possibilité / probabilité de consistance d'une distribution. L'aspect de la logique possibiliste conduit, à ce niveau, à introduire du flou en admettant comme envisageables des scénarios d'endommagement qui se situeraient en dehors du cône des futurs possibles, dans le cadre du modèle probabiliste (PGA de 0.1 ou de 0.2). En parallèle, même si la logique floue introduit ce type de flou, on voit aussi que du fait de la taille importante du noyau de certitudes (qui rappelons-le est justifiée par l'observation empirique de l'endommagement de l'ensemble des postes dans une zone où le PGA était supérieur à 5), elle nous conduit alors, un peu paradoxalement, à envisager une partie importante des scénarios d'endommagement avec moins de variabilité et d'incertitude que la logique probabiliste.

Dans le cadre des modèles probabilistes, l'incertitude sur la variabilité du phénomène a en fait, tendance à être répartie artificiellement sur l'ensemble des plages de variations du phénomène. Inversement, la logique possibiliste permet de concentrer l'incertitude dans seulement certaines plages de variations du phénomène, en l'occurrence les PGA compris entre 0.1 et 0.5. Cette idée de concentration de l'incertitude nous paraît importante et nous l'avions déjà évoquée sur un plan plus spatial au premier et au second chapitre, en soulignant que dans les systèmes complexes peuvent apparaitre des zones d'hypersensibilités locales, fortement critiques, qui concentrent l'incertitude de la trajectoire du système. On peut donc se

demander si en concentrant l'incertitude sur certaines plages ou certaines composantes du système, la logique possibiliste n'offre pas un cadre d'estimation de l'incertitude plus conforme à la réalité et à notre connaissance des phénomènes que ne le propose la logique probabiliste.

Par contre, le passage de la figure 24 à la figure 25 n'est pas un changement de cadre au sens du premier passage puisque nous restons dans une logique de possibilité. Comme nous l'avons déjà souligné, l'approche par le flou de type 1 aboutit à une valeur d'appartenance précise d'un évènement à un niveau de possibilité de réalisation ce qui peut apparaître un peu paradoxal et inadapté pour traiter de phénomènes dont on sait qu'ils sont justement imprécis ou incertains. Le flou de type 2 est une réponse possible à cette critique.

L'idée de flou de type 2, évoquée par Zadeh, dès la construction des bases du cadre théorique possibiliste et approximatif, a pour but d'introduire un second niveau d'incertitude, dont les résultats ne sont pas des valeurs d'appartenance précises à un degré de possibilités mais des intervalles d'appartenance d'un évènement à un degré de possibilités. Dans notre cas, l'introduction d'un niveau supplémentaire d'incertitude rend possible de nouvelles situations puisqu'elle conduit à un léger dépassement du cadre initial du support de possibilités (partie bleue à gauche de la distribution des possibilités de type 1), mais elle tend principalement à envisager une sensible diminution des possibilités d'endommagements puisque la partie bleue à l'intérieur du cône des possibles est nettement plus importante que la partie à l'extérieur de l'ensemble initial. Assez logiquement, l'ensemble des possibilités de type 1 est compris dans l'empreinte d'incertitude du flou de type 2, il en est de même pour la distribution des probabilités.

3.2.4.4. Méthode d'estimation de la susceptibilité et traitement de l'imprécision verbale par le flou de type 2.

Dans le cas précédent, nous envisagions le flou de type 2 comme une méthode possible pour appréhender des évènements dans une logique d'anticipation tout en introduisant des niveaux d'incertitude supplémentaires (combinant incertitude spatiale et temporelle, par exemple). Toutefois, beaucoup d'autres types d'incertitudes et d'imprécisions peuvent être appréhendés dans ce cadre de flou de type 2, et en particulier le traitement d'informations syntaxiques qui constitue un des champs d'applications les plus communs et anciens de ces méthodes puisque dès 1975, Zadeh proposait les principes d'association d'un mot à un ensemble flou (Zadeh, 1975).

Pour plusieurs auteurs néanmoins, le flou de type 1 serait un cadre scientifique incorrect pour modéliser l'information verbale, la démonstration de (Mendel, 2002, 2004) tient par exemple, en trois temps :

- L'appartenance d'un mot à un degré de possibilité dans le cadre du flou de type 1 est établie comme totalement certaine.
- Les mots possèdent des sens différents selon les individus et sont par nature incertains.

- Il est donc contradictoire de recourir à une méthode qui définit précisément un unique degré d'appartenance à une possibilité pour désigner un mot dont le sens est par nature approximatif et relatif.

Également selon Mendel, il convient d'établir une distinction entre d'une part, l'intra-incertitude liée au caractère approximatif intrinsèque d'un mot pour une personne, et d'autre part, l'inter-incertitude liée au sens relatif du mot pour un groupe de personnes. Par exemple, lorsque Hans dit à son amie « je te rejoindrai plus tard », « plus tard » correspond dans son esprit à un intervalle de temps entre environ trente minutes et environ deux heures, alors que pour son amie, « plus tard » renvoie à un intervalle entre environ dix minutes et environ une heure. Il y a donc une intra-incertitude dans le sens où même Hans n'est pas en mesure de définir un degré précis de possibilités pour qu'il arrive dans une heure plutôt qu'une autre ; et une forme d'inter-incertitude importante dans la question des informations verbales, puisque généralement, la communication qu'elle soit orale ou écrite, implique au moins deux individus.

Dans la figure suivante, en prenant l'exemple de l'expression « some » (« quelques » en français) Mendel propose de distinguer, à un niveau individuel, l'intra-incertitude du mot « some » comme un intervalle flou de type 2, puisque même individuellement, la personne n'est pas en mesure de définir précisément à quel degré de possibilité attribuer une valeur. Il utilise l'image d'un pinceau plus ou moins épais à partir duquel une personne pourrait définir plus ou moins précisément son degré de possibilité que le nombre 4 par exemple, appartienne à l'ensemble flou « some ». Certains mots vont nécessiter des pinceaux épais quand ils contiennent beaucoup d'incertitude, plus fins quand ils en contiennent moins et il est possible qu'un même mot nécessite plusieurs pinceaux. Le croisement entre les flous de type 2 de l'intra-incertitude syntaxique et de l'inter-incertitude représente ensuite l'incertitude globale qui entoure cette expression. Mendel utilise finalement la notion d'empreinte de l'incertitude (FOU pour Footprint for uncertainty) de l'expression « some » pour désigner l'incertitude totale, de limites hautes (UMF pour upper model fuzzy) et de limites basses (LMF pour lower model fuzzy) de possibilités pour qu'une valeur soit comprise dans l'ensemble « some ».

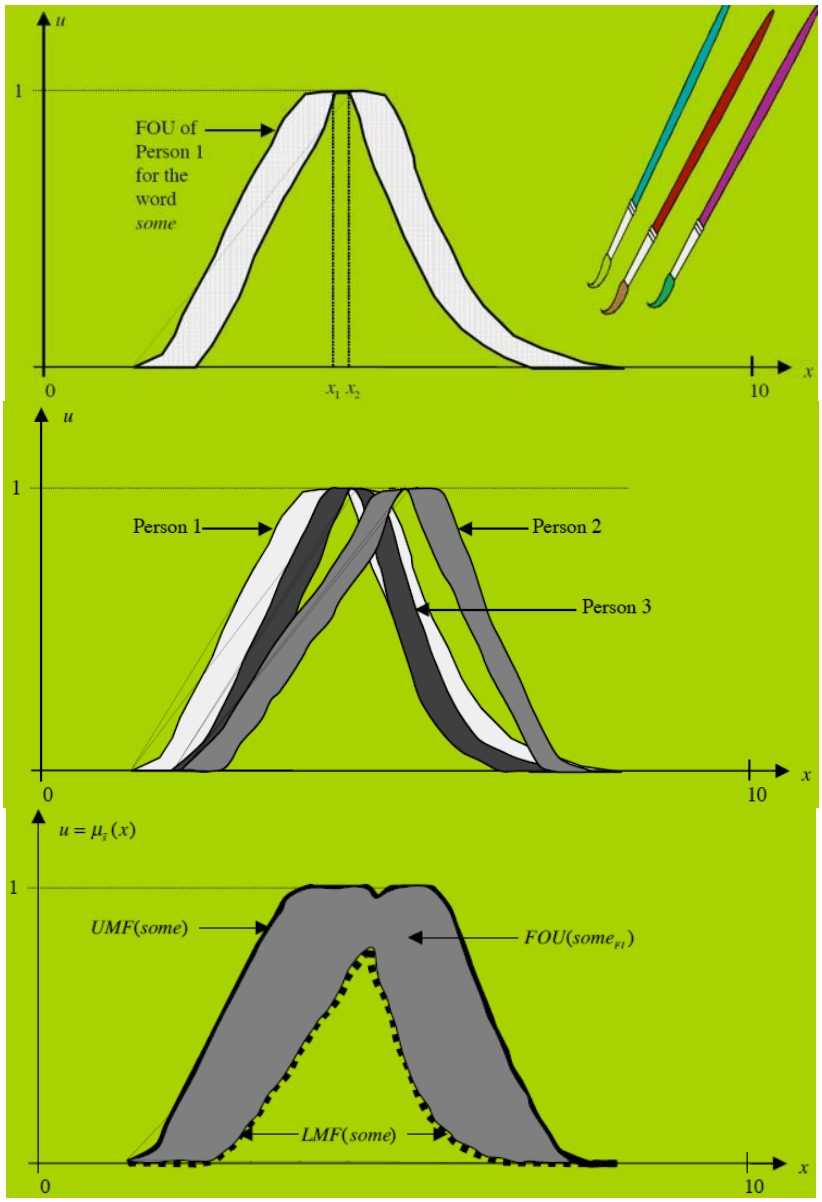


Figure 26 : Intra et inter incertitudes syntaxiques et la modélisation d'ensemble flou de type 2, l'exemple du mot «some ». (Mendel, 2004).

3.3. ESTIMATION DE LA CRITICITÉ COMME UNE POSSIBILITÉ DE DIFFUSION DU SYSTÈME DE RISQUES

3.3.1. Gravité, criticité et redynamisation spatiale

Si la susceptibilité s'intéresse davantage aux composantes spatiales qu'aux relations entre ces composantes, à l'inverse, la criticité et le potentiel impactant réticulaire qui sert de base à son estimation considèrent la connexité, les imbrications et les propriétés systémiques des systèmes territoriaux de manière à estimer la capacité des territoires à diffuser et faire émerger de nouveaux impacts en cas de perturbation initiale. La criticité considère en effet les possibilités de réactions en chaînes et de rediffusions d'effets indirects à partir du

déclenchement d'un impact initial. Au fur et à mesure des effets dominos, les territoires sont successivement susceptibles de subir puis d'infliger un impact. Ainsi, en fonction des espaces directement impactés, à chaque stade de la séquence d'évènements correspond une redynamisation éventuelle du système de risques et une repotentialisation spatiale éventuelle d'impacts indirects. L'estimation de la criticité pour un sous-espace donné vise dans notre cas, à estimer les possibilités de redynamisation du système de risques et les trajectoires spatiales possibles, associées dans un premier temps à l'endommagement des postes de transformation ou de distribution du réseau électrique implantés dans ce sous-espace.

Si l'on associe l'idée de criticité à l'idée de gravité, cela justifierait également d'intégrer à l'analyse de la criticité, l'analyse des impacts sociétaux des dysfonctionnements techniques. Toutefois, à l'échelle de nos systèmes de risques, il nous est apparu opportun de dissocier clairement deux éléments qui sont tous les deux déterminants pour caractériser la gravité d'une coupure électrique mais qui ont des implications très différentes en termes de dynamique spatiale du système de risques.

La première caractéristique de la gravité est liée à la possibilité que la coupure électrique, induite par l'endommagement d'un poste, provoque le dysfonctionnement d'une autre composante d'un réseau technique, ce qui va contribuer à induire une redynamisation du système de risques, de nouvelles diffusions et donc de nouvelles différenciations spatiales des impacts. La criticité s'intéresse donc à des enjeux qui sont à la fois des cibles et des sources du système de risque. Ces enjeux critiques possèdent donc également une forme de dépendance mais nous choisissons, pour les distinguer des enjeux de dépendance simples, de les qualifier pour leur criticité.

La seconde caractéristique est liée à la possibilité qu'une coupure électrique engendre des impacts sociétaux importants. En termes de gravité, cette caractéristique est donc déterminante, néanmoins contrairement à la catégorie précédente, elle n'implique pas de redynamisation spatiale du système de risques. Contrairement au cas précédent où la criticité est à la fois cible et source du danger, les enjeux de dépendances sont simplement des cibles dans les systèmes de risques, des enjeux « finaux », des points de destinations dans la trajectoire de diffusion du système de risques. Nous parlerons alors de dépendance.

Cette conception de la criticité est d'ailleurs fondée d'un point de vue théorique puisqu'en sûreté nucléaire par exemple, la criticité d'une opération renvoie au risque que cette opération provoque justement des réactions en chaîne. La distinction établie plus haut, entre criticité et dépendance, trouve donc une justification particulièrement sensée dans l'analyse des systèmes de risques et de leurs dynamiques spatiales.

3.3.2. La logique itérative d'une diffusion spatiale par points de basculement du système de risques

La criticité est initialement associée à une composante nodale du réseau électrique dont l'endommagement provoquerait la coupure d'alimentation d'une zone dans laquelle sont implantées une ou plusieurs autres composantes du système technique pour lesquelles la

coupure électrique est susceptible d'engendrer des dysfonctionnements et donc de nouvelles trajectoires possibles de diffusion du système de risques.

Cette logique de diffusion spatiale repose sur l'idée que la structure réticulaire des territoires produit des points de basculement dans la trajectoire des systèmes de risques, le fait qu'un point de basculement soit perturbé va provoquer un changement d'état dans une zone plus ou moins importante, le changement d'état dans cette zone pouvant perturber un autre point de basculement compris dans la zone impactée, qui va à son tour provoquer le changement d'état dans un autre sous ensemble. La propagation du système de risque est donc assurée par une logique spatiale d'effets dominos qui alternent des dommages ponctuels à des transformations zonales.

Cette logique itérative de la diffusion est inspirée du modèle stochastique de croissance « Random Spread » RS (figure 27) (Serra, 2007). Ce modèle, appliqué et validé sur le cas des incendies de forêt dans l'état de Selangor en Malaisie, repose sur l'hypothèse que la diffusion de certains phénomènes complexes est bien moins dépendante de facteurs « externes » (vent, pression ou température) que de facteurs isotropes liés à l'organisation spatiale sur lesquels sont susceptibles de s'effectuer ces dynamiques de propagation (et qui donc partiellement les effectuerait elle-même).

Le modèle RS associe les ensembles fermés aléatoires (Matheron, 1975) à des chaînes de Markov et s'appuie sur le tirage de points aléatoires d'éclosion d'incendies, qui vont se propager dans l'espace à des rythmes et dans des directions différentes en fonction des conditions de l'espace sur lesquels ils se propagent. A l'intérieur de ces surfaces endommagées, de nouveaux points d'éclosion sont tirés aléatoirement et vont engendrer une nouvelle propagation zonale à l'intérieur de laquelle on peut déterminer de nouveaux points d'éclosion possible. Dans la figure suivante, le processus de diffusion est initié dans le point X0, il se diffuse à l'ensemble δ(X0), puis est rediffusé dans deux directions opposées à partir de Y1 et Y2… La diffusion se fait donc de zone en zone, mais aussi partiellement zone sur zone puisqu'il y a systématiquement une superposition partielle des ensembles fermés.

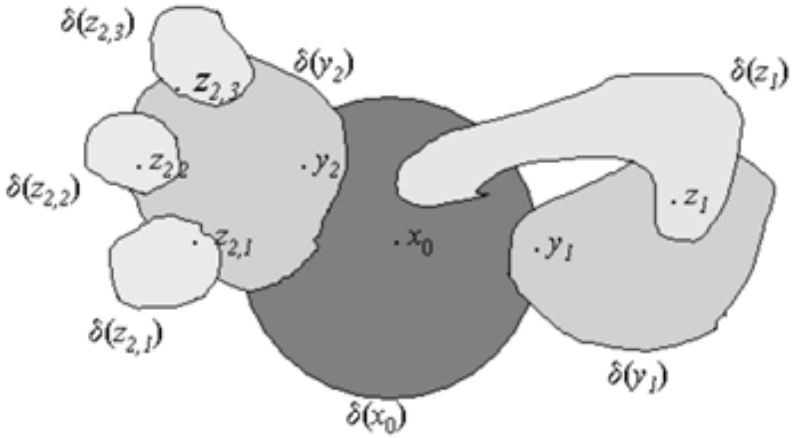


Figure 27 : La logique de diffusion dans le modèle Random Spread (Source : Serra, 2007).

Le modèle RS fonctionne dans un espace euclidien, or nous avons souligné tout au long de cette recherche, l'importance de mécanismes réticulaires dans la trajectoire de diffusion des systèmes de risques, il nous faut donc préciser comment est intégré le réseau. Pour mieux expliciter le lien entre les logiques de diffusion du modèle RS et notre objet d'étude, réinterprétons la figure précédente dans le cadre des effets dominos liés aux réseaux, et imaginons que :

X0 : Une perturbation initiale qui se diffuse à partir de X0 dans l'ensemble δ X0 (explosion, rupture de canalisation d'eau, incendie, séisme…).

Y1 et Y2 : L'endommagement de deux postes sources du réseau électrique provoquant une coupure dans les zones δ (Y1) et δ (Y2).

Z 1 à Z2 : Pompes du réseau d'eau potable impactées par la coupure électrique dans les zones δ (Y1) et δ (Y2) et qui, pour une raison ou une autre, ont cessé de fonctionner, suite à la panne électrique.

Jean Serra parle de « sièges » (seats) pour désigner ces points de rediffusion, ce qui n'est d'ailleurs pas sans rappeler la citation de René Thom du premier chapitre désignant les zones qui concentrent l'incertitude comme étant les potentiels « sièges de catastrophes généralisées ». Dans notre cas, les points de basculement des systèmes de risques ne sont pas compris dans la totalité de l'ensemble aléatoire mais dans les nœuds d'une structure réticulaire ; en revanche à partir de l'endommagement du nœud, va effectivement se produire la diffusion du dommage du point à une zone, puis en prenant appui sur un ou plusieurs nouveaux points, vont pouvoir propager des impacts indirects et ainsi de suite.

Une autre spécificité importante des systèmes de risques que nous avons mis en avant au premier et second chapitre, vient de l'importance de l'imbrication et des logiques verticales dans la structuration des systèmes de risques. Ainsi, il nous faut aussi concevoir un tissu d'interdépendances qui tienne compte du double niveau vertical et horizontal d'organisation des interdépendances.

A partir de là, on peut distinguer plus clairement, les deux étapes de notre démarche d'estimation de la criticité : d'abord, la délimitation des aires de dépendances spatiales associées aux composantes nodales des réseaux électriques et des réseaux techniques ; ensuite, la définition des interdépendances à l'échelle du réseau technique et des degrés de possibilités de transformation de ces interdépendances des réseaux en causalités spatiales dans les systèmes de risques. Dans ces deux étapes, il existe à nouveau plusieurs types d'incertitudes, d'imprécision et de méconnaissance qu'il apparaît indispensable de prendre à compte.

Même si nous avons fait le choix de travailler sur plusieurs types de réseaux techniques, le réseau électrique est, nous l'avons précisé, considéré dans cette recherche en amont du système technique c'est-à-dire que « l'entrée » d'une perturbation externe comme une inondation ou un séisme dans le système de risques se réalise par l'intermédiaire du système électrique. Nous ne sommes donc pas amené à travailler sur l'endommagement potentiel de l'ensemble des réseaux techniques mais exclusivement sur celui des composantes électriques. L'endommagement des réseaux électriques peut donc être un dommage initial ou indirect du

système de risque, alors que pour les réseaux techniques, il ne s'agit que de dysfonctionnements découlant de la dépendance électrique. Par ailleurs il est possible que ces dysfonctionnements rétroagissent sur le réseau électrique mais initialement l'endommagement électrique est prédécesseur dans l'ensemble des cas. La méthode de délimitation des bassins de dépendance associée aux postes électriques a donc été présentée de manière privilégiée.

Même s'ils seront intégrés dans l'analyse rétrospective sur les dommages aux infrastructures lors de la tempête de Neige dans le Var en 2001, du point de vue de la détection des espaces à enjeux dans une logique d'anticipation des systèmes de risques, la démarche porte à l'heure actuelle, exclusivement, sur l'endommagement des postes de transformations et de distributions, c'est-à-dire des composantes nodales de l'infrastructure électrique et n'intègre pas directement la vulnérabilité des lignes. L'approche proposée tend à tenir compte, lorsque cela a un sens à l'échelle du territoire ou de l'évènement analysé, du réseau de transport et du réseau de distribution électrique.

Dans ce cadre, les notions d'imbrication et de structuration verticale du réseau présentées au chapitre 2, jouent évidemment un rôle déterminant dans la compréhension des dynamiques spatiales possibles des systèmes de risques et nous conduisent à envisager d'abord le réseau électrique comme un réseau hétérogène et hiérarchique, dans lequel un nombre de nœuds limité possède un très grand nombre de nœuds dépendants. Cette structure dont les enjeux théoriques et les implications en termes de stabilité ont été présentés au chapitre 1, induit donc un modèle d'interdépendance spatiale fondée sur l'imbrication.

3.3.3. Estimation de la criticité et des bassins de bassins de dépendance

3.3.3.1. La structure hétérogène et hiérarchique du réseau électrique

Le système électrique est un réseau multi-niveau, reposant sur l'imbrication de lignes de niveaux de tension variables en fonction de la distance sur laquelle l'énergie est amenée à être transportée (augmentation de la tension du courant pour limiter l'effet Joule engendrant une perte d'énergie tout au long du transport). Les postes de transformations assurent le passage d'un niveau à un autre de tension, les différents niveaux du réseau étant eux-mêmes interdépendants, de telle sorte qu'une défaillance d'une ligne de tension importante affecte les lignes afférentes de niveau inférieur, tout comme des défaillances en chaînes sont susceptibles d'engendrer une défaillance du réseau à un niveau supérieur.

La recherche n'intègre pas la vulnérabilité des lignes électriques, ni des sites de production et prend le parti de s'appuyer spécifiquement sur les postes de transformations et de distribution, en accordant une attention particulière aux composantes à l'interface entre différents niveaux du réseau, depuis les sites de production jusqu'à leur desserte finale.

Sans rentrer dans une présentation technique du réseau électrique qu'on pourra facilement retrouver sur le site de RTE (Réseau de Transport d'Electricité), précisons que le réseau électrique en France s'appuie en amont sur le réseau de transport électrique, ses niveaux de tensions alternatifs sont compris entre 63 000 volts (63kV) et 400 000 volts (400kV). On distingue généralement les liaisons 400 kV, dites lignes de grand transport (des distances de

l'ordre de 400 kilomètres), des lignes de répartition régionale en 225 kV, 150 kV (rare), 90 kV et 63 kV. En aval, ce réseau de transport alimente le réseau de distribution électrique propriété des communes depuis 1906, qui vont dans la plupart des cas, établir une délégation de service public confiant à ERDF (Electricité Réseau Distribution France) la concession de ce réseau. Le réseau de distribution repose sur un réseau HTA (20kV) et un réseau BT pour basse tension, qui délivre le courant aux clients résidentiels en 225 volts, alors que les clients industriels vont pouvoir être alimentés directement par le réseau HTA en 20 kV.

On distingue classiquement trois grands domaines de tensions : HTB dont la valeur de tension est supérieure à 50 kV en alternatif, HTA dont la valeur de tension est comprise entre 1 kV et 50 kV et BT dont la valeur de tension est comprise entre 225V et 1kV. Dans les grandes villes, le courant arrive généralement à partir de postes de transformations avec en entrée des niveaux de tensions en 225, 90 ou/et 63 kV. Ces postes sont qualifiés de « postes sources ». A partir de ceux-ci, le niveau de tension est diminué et passe généralement en 20 kV, il s'agit donc de poste de transformation HTB/HTA. A partir de ces postes HTB/HTA, l'énergie est redirigée dans des lignes 20kV soit vers des clients de type industriel qui vont être directement alimentés en courant 20kV, on parle alors de « poste client », soit vers des postes HTA/BT, où l'énergie va être redescendue à un niveau de 225V, correspondant à l'usage résidentiel et domestique classique de l'électricité en France.

Notre enjeu initial de délimitation des aires de dépendance associées aux composantes des réseaux techniques peut s'envisager de deux manières différentes qui vont dépendre en partie des données à notre disposition pour les délimiter. Dans le premier cas, on va s'appuyer sur les rapports d'interdépendances verticales des postes de transformations HTB/HTA et HTA/BT ; la délimitation est alors déduite de calcul sur graphe visant à repérer, pour chaque poste HTA/BT, le poste de niveau supérieur qui lui est le plus accessible. La démarche peut être également envisagée pour rattacher les postes finaux (les coffrets de distributions) aux postes HTA/BT.

Si les données sur les postes sources et leurs localisations sont relativement faciles à obtenir dans la mesure où l'on peut les trouver dans des bases de données géographiques généralistes comme la BD Topo de l'IGN, en revanche, celles sur les postes HTA/ BT sont plus délicates à recueillir. Une autre alternative est donc proposée pour les cas où la donnée de niveau HTA/BT s'avèrerait inaccessible mais également pour envisager d'autres types de segmentations possibles. Dans ce second cadre, il ne s'agit plus de calcul sur graphe mais d'une démarche de segmentation d'image à partir de diagrammes de Voronoï. Les diagrammes de Voronoï sont une méthode classique de régionalisation d'un espace à partir d'un semis de points. Nous reprendrons une définition classique : « Etant donné un semis de deux points distincts ou plus dans un espace euclidien, on associe chaque localisation de cet espace avec l'élément du semis de point qui lui est le plus proche. En résulte une tessellation de l'espace en un ensemble de régions associées avec un élément du semis de points. » (Okabé, 2000). L'efficacité et la facilité à mettre en œuvre des diagrammes de Voronoï expliquent le recours de plus en plus fréquent à cette technique dans les applications en géomatique. Les systèmes d'informations géographiques « classiques » comportent d'origine une application dédiée à la construction de diagrammes de Voronoï.

Cette méthode comporte cependant, une limite majeure dans la mesure où elle pose pour hypothèse que tous les points du semis sont strictement identiques et exercent une influence de même poids sur le territoire. Ainsi, par rapport à notre contexte, l'usage des diagrammes de Voronoï standard implique que tous les postes de transformation HTB/HTA soient considérés de manière identique. Or, dans la mesure où par cette technique, nous ne tenons compte ni d'autres niveaux d'organisation des nœuds du réseau de délimitation, ni de l'occupation du sol dans cette délimitation, nous estimons que nous devons produire une segmentation plus pertinente et pour cela, prendre en compte, *a minima,* l'hétérogénéité des niveaux de postes HTB/HTA. Nous aurons donc recours aux techniques de pondération des diagrammes de Voronoï (Huff, 1973, Okabé, 2000, Mu, 2005) pour proposer une segmentation que nous pensons plus pertinente dans le cadre des données traitées.

Enfin, nous réintroduirons l'idée d'incertitude et d'imprécision dans la délimitation de ces bassins de dépendances spatiales. En effet, s'ils possèdent une existence réelle précise à un moment (t), on ne peut donc pas parler de limites floues de nature, ces structures spatiales sont néanmoins potentiellement mouvantes selon l'intensité des flux et des configurations techniques du réseau. De plus, cette structure spatiale à échelle fine ne peut pas être connue précisément et avec certitude du fait de l'incertitude de notre connaissance sur le cheminement des flux. L'imprécision spatiale intervient alors comme un moyen de prendre en compte l'incertitude de notre connaissance possible sur les structures spatiales induites par l'organisation des réseaux électriques. Nous envisagerons alors une manière d'intégrer le flou d'une part, dans le cadre des calculs sur graphe (Grasland, Hamez, 2007) et d'autre part, dans la méthode de segmentation d'image en nous appuyant sur la notion de franges spatiales floues (Rolland May, 1987).

3.3.3.2. La délimitation des bassins de dépendances spatiales fondée sur l'analyse des interdépendances verticales dans les réseaux électriques

La première logique de délimitation des aires de dépendances associées aux postes électriques s'appuie prioritairement sur la dimension hiérarchique entre les deux niveaux de postes de transformation (HTB/HTA) d'un côté et (HTA/BT) de l'autre. Pour déterminer les bassins de dépendance, la structure hiérarchisée des réseaux est utilisée. Ainsi, en tenant compte de la loi selon laquelle l'électricité emprunte le plus court chemin[1]sur le réseau pour aller d'un point A à un point B, l'hypothèse est faite qu'un poste de transformation (HTA/BT) est dépendant du poste de niveau supérieur HTB/HTA (dit poste source) qui lui est le plus accessible parmi l'ensemble des postes de niveaux supérieurs. Cette hypothèse est volontairement simplificatrice car l'organisation des flux électriques obéit également à d'autres lois nettement plus complexes ; néanmoins elle permet de travailler uniquement sur la structure topologique du réseau et non pas sur ses flux.

L'analyse des plus courts chemins sur les réseaux multi-niveaux permet de délimiter des sous-systèmes spatiaux (figure 28a.) qui correspondent à des espaces dont l'alimentation dépend d'un même poste de transformation. Dans l'exemple, la distance de Delaunay entre chaque

[1] Ou plus exactement le chemin de moindre effort (fonction de la distance relative, de la résistance des lignes et de l'impédance).

poste de transformation HTA-BT et chaque poste de transformation HTB-HTA est mesurée ; le recours à la notion de chemin de Delaunay permet de comparer les résultats sur le réseau réel à un réseau optimal où « les arêtes exploitent au mieux la répartition spatiale des sommets sur la zone d'emprise du réseau » (Gleyze, 2005). Pour chaque poste HTA-BT, la distance relative au poste source HTB-HTA le plus proche permet d'identifier son poste de dépendance, de telle sorte que les postes sources disposent d'un ensemble de postes HTA/BT dépendants, dont la répartition permet d'identifier des bassins de dépendance (figure.28b). La configuration multi-niveau du réseau électrique structure donc des sous systèmes spatiaux imbriqués susceptibles de se différencier s'ils sont soumis à un évènement externe.

A partir de ces bassins de dépendance, il est envisageable de tester l'hypothèse de présence d'un ou plusieurs enjeux critiques dans le périmètre impacté par la coupure électrique et pouvant conduire à l'émergence d'impacts indirects. Les enjeux critiques correspondent à des nœuds de réseaux techniques dépendant de l'alimentation électrique, ici par exemple, la présence d'un poste releveur du réseau d'assainissement dans la zone de dépendance au poste source B est simplement symbolisée par une étoile. S'ils viennent à se réaliser ces impacts indirects disposent eux-mêmes d'un potentiel impactant dans le périmètre de dépendance de l'enjeu critique, ce qui contribue à complexifier encore d'avantage les imbrications spatiales du système de risques et à diffuser de nouveaux impacts. On retrouve la logique d'un modèle par point de basculement et par itération évoquée précédemment.

Une limite de la technique telle qu'elle est présentée dans la figure 28 est de ne pas pouvoir prendre en compte la différence de niveaux de tensions entre les postes sources. Elle introduit donc une forme d'imprécision en considérant simplement les grands domaines de tensions (HTB) alors que l'on peut légitimement penser qu'il y aurait un intérêt à mieux différencier ces niveaux et plutôt considérer distinctement les postes de transformation HTB du réseau de répartition en trois classes 63, 90 et 225kV. Pour y remédier, il est possible d'établir un seuil maximum de postes de distributions HTA/BT rattachables aux postes sources en fonction du niveau de tension de ces derniers ; ce seuil serait par exemple égal (ou environ égal en introduisant une nouvelle imprécision) à un rapport entre le nombre total de postes de distribution divisé par le nombre total de postes sources ; on obtiendrait d'abord un nombre identique pour chaque poste source qu'il serait ensuite possible de pondérer en fonction du niveau de tension du poste, de manière à ce que par exemple, un poste de tension 225kV ait environ 225/60 plus de postes de distribution qu'un poste de tension 63kV.

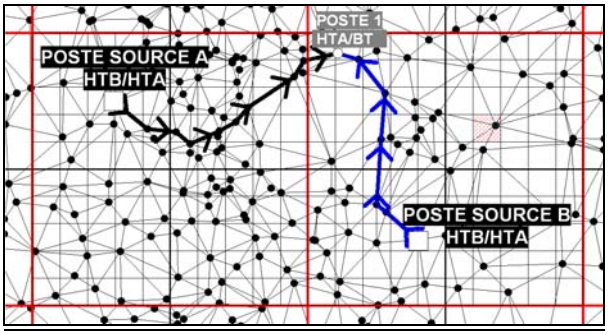
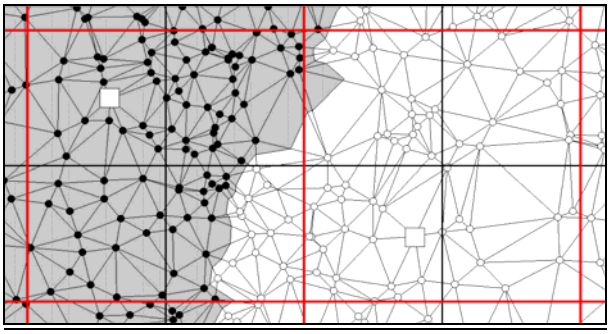


Figure 28 (a) : Détection des Chemins de Delaunay entre poste de transformation HTA/BT et deux postes de transformation HTB/HTA …



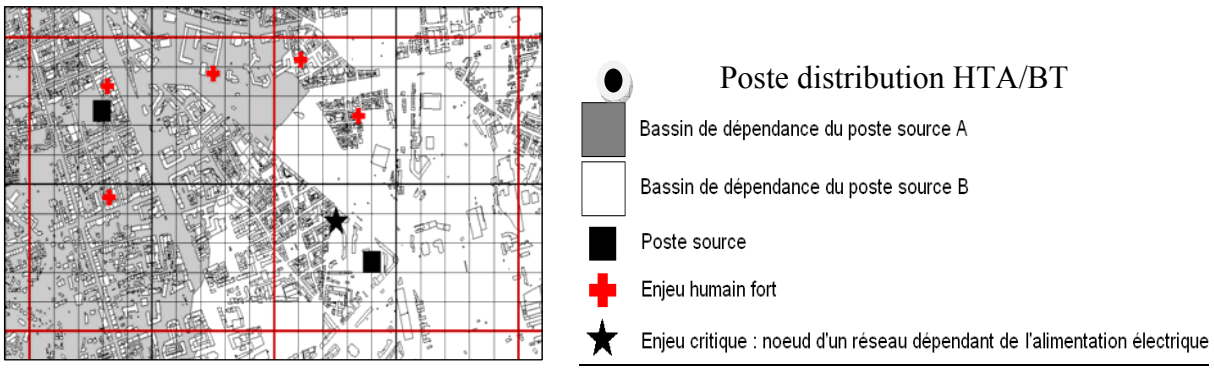


Figure 28 (b) : … pour déterminer les interdépendances des postes de niveaux différents et les bassins de dépendance associés aux postes.

3.3.3.3. La délimitation des bassins de dépendances spatiales fondées sur les partitions de Voronoï pondérées de manière multiplicative (VPM)

Compte tenu de la structure très hiérarchisée du réseau de transport électrique et de la diversité des niveaux de voltages en entrée et en sortie des postes de transformations électriques, nous avons fait appel aux techniques de pondération des tessellations ou polygones de Voronoï qui permettent de différencier les points du semis en termes de poids et donc de sphères d'influence. La technique de pondération utilisée est dite multiplicative, c'est-à-dire qu'elle ne considère pas la distance réelle entre les points, mais la distance multipliée par une valeur de pondération associée à chaque point pour construire la tessellation. Dans

notre cas, les valeurs de pondération correspondent aux niveaux de voltage du courant à l'entrée du poste de transformation électrique.
Dans notre cadre, l'intérêt premier de cette technique reste avant tout sa capacité à permettre une modélisation des bassins de dépendances spatiales des postes électriques à partir de peu d'informations spatiales sur l'organisation des réseaux électriques et sur les territoires. Toutefois, on ne peut admettre qu'au nom de l'imprécision ou de l'incomplétude des données d'entrée, la modélisation produise un résultat non cohérent ou absurde, auquel cas il serait préférable de ne pas envisager ce type de méthodes approximatives. Le niveau de performance de la méthode sera donc testé puis comparé aux résultats obtenus à partir d'autres techniques. Dans le chapitre 6, nous reviendrons alors plus en détail sur les aspects techniques de la construction des VPM et sur leur intérêt potentiel pour la modélisation spatiale des systèmes de risques associés à l'endommagement de composantes nodales des réseaux techniques.

3.3.3.4. L'intégration du flou artificiel pour modéliser les bassins de dépendances spatiales

Le caractère dynamique, instable et partiellement méconnu des limites spatiales des coupures électriques

Si dans le cadre de l'estimation de la susceptibilité, nous avons surtout envisagé le caractère naturellement incertain et imprécis des systèmes de risques, le recours à l'imprécision spatiale et aux limites floues dans la modélisation des bassins de dépendances spatiales associés à l'impact de l'endommagement d'une composante du réseau électrique ne fait pas référence au type « espaces flous naturels ». En effet, il existe bien des sous-espaces précis qui vont être impactés par la coupure électrique en cas d'endommagement d'une composante du réseau auquel d'autres composantes ne pourraient pas remédier. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 2, cette différenciation entre espaces coupés et non coupés est potentiellement complexe, et imbriquée de manière multi-niveau, mais elle possède néanmoins une délimitation précise dans l'espace considéré, ne serait-ce qu'à une échelle très fine.

Néanmoins, le réseau électrique produit une structure spatiale mouvante en fonction des flux sur le réseau, de la disponibilité des équipements ou encore et bien sûr, en fonction de choix des agents en termes de conduite du réseau. Même à supposer que l'on puisse la connaitre parfaitement, cette structure spatiale étant par nature dynamique, il est paradoxal de l'envisager dans le cadre d'une méthode statique et même d'envisager pouvoir en tracer une frontière unique, à moins que ce ne soit dans une optique d'analyse en quasi temps réel ou du moins régulièrement réactualisé de ces limites. Cet élément donne une première justification à l'utilisation d'une logique approximative.

D'autre part, notre recours à l'imprécision spatiale renvoie surtout à une forme d'incertitude et de méconnaissance de cette structure et il nous appartient d'éclaircir les raisons de cette méconnaissance. Préciser en particulier là où s'arrête la connaissance possible de cette structure spatiale, et là où s'est arrêtée notre propre connaissance de cette structure, compte tenu de différentes contraintes, choix et capacités techniques. Eclaircissons d'abord ce que

nous appellerons l'incertitude généralisée qui ne tient donc pas à nous « personnellement », mais plutôt à la connaissance actuelle sur les réseaux électriques.

Malgré cette notion de choix qui est importante et que nous préciserons dans le chapitre 4 notamment dans le cadre des opérations de délestage volontaire, il ne faut pas en déduire pour autant que les opérateurs électriques disposent d'une connaissance parfaite du réseau et des limites spatiales qu'impliquerait l'endommagement de chaque poste. Nous avons dans le premier chapitre évoqué par exemple les divergences entre Wang et Hines sur la capacité des relations topologiques à simuler la diffusion des réseaux électriques à partir de graphes unidirectionnelles, dans la mesure où l'on observe très souvent des inversions de sens des flux lors de défaillances en cascade (Chassin, Posse 2005), le défaut peut remonter vers la source.

Pour mieux comprendre la part de flou et d'imprécision qui caractérise la connaissance à échelle fine des zones impactées par une coupure électrique et ce, même pour les gestionnaires et ingénieurs électriques dont on peut penser qu'ils ne sont pas parmi les plus sous-équipés pour affronter des problèmes de ce type, nous nous appuierons sur un évènement survenu dans le Queens à New York, relaté dans un article du New York Times du 21 juillet 2006 sous le titre « Blackout in Queens affects many more than estimated ».

On y apprend qu'une panne électrique de plus de 5 jours, en plein été, dans le quartier du Queens qui était annoncée par les responsables du gestionnaire du réseau électrique comme un aléa touchant 2 000 personnes, était en fait plus proche d'impacter pas moins de 100 000 personnes. Pour expliquer l'estimation initiale de 2 000 personnes :

- la première hypothèse émise officiellement par le Maire est que pour les gestionnaires électriques, un « client » peut être tout aussi bien une personne seule qu'un immeuble entier. Il estime aussi que cette hypothèse a une faible probabilité d'être exacte et elle sera effectivement reconnue comme fausse par la suite.
- La seconde hypothèse émise par une partie des populations et des autorités est que les gestionnaires électriques ont délibérément menti et cherché à faire disparaître pendant plus de 5 jours, 98 000 personnes de leurs estimations pour minimiser les impacts négatifs de cette panne.
- La troisième hypothèse repose sur l'explication fournie par le gestionnaire électrique lui-même qui relate que la première estimation était simplement basée sur le décompte des appels téléphoniques des individus signalant une panne électrique à leur domicile. Cette explication est en même temps un aveu de faiblesse.

En effet, en admettant cette troisième hypothèse, la question qui vient rapidement à l'esprit est comment se fait-il que, techniquement, les gestionnaires n'aient pas été en mesure de produire (et communiquer) rapidement une estimation plus fiable de cette panne ? C'est d'ailleurs la question que se sont posés beaucoup d'habitants et de responsables des autorités, ce qui a fait de la capacité des gestionnaires électriques à connaître finement et précisément la répartition des flux électriques et des zones impactées par une coupure, une question passant de la sphère du technique à une question publique, posée par exemple au maire lors d'une émission de radio. La réponse du maire, explicitement citée dans l'article : « Ils ne peuvent pas le dire depuis leur ordinateur. », n'a pas pour but de mettre en accusation les gestionnaires

électriques, mais plutôt d'informer les populations de l'impossibilité de connaître exactement et précisément la répartition des bâtiments coupés et non coupés en l'état actuel des connaissances et de l'équipement du réseau.

Cette information semble d'abord surprenante mais est finalement assez logique puisqu'il n'existe pas, à partir de l'ensemble des postes de distributions, ni des compteurs individuels, un moyen de retransmettre en temps réel une information sur l'état de l'équipement électrique ou sur la quantité de flux qui transite par celui-ci. Il n'est donc pas possible de connaître avec précision et exactitude le périmètre d'une panne électrique à une échelle très fine. Il faut savoir par exemple que seulement une partie des postes de distribution sont équipés d'OMT (organe manœuvré par télécommande), à l'échelle d'une ville française comme Marseille, les experts d'ERDF nous ont indiqué qu'on trouve en moyenne un OMT environ tous les dix postes, ce qui en cas de panne, conduit à ne pas savoir précisément où se situe exactement le défaut, et pose des difficultés importantes de détection de panne multi-défaut (qui caractérise par ailleurs les cas d'endommagement des réseaux par une perturbation externe).

Même en s'appuyant sur les observations des agents de terrain, l'estimation à une échelle fine reste difficile, au point par exemple, que la société Edison avait lors de la panne du Queens, « conseillé à ses clients alimentés en électricité, de laisser une lampe allumée toute la nuit jusqu'à la complète restauration du service de manière à aider les équipes de terrains à repérer les maisons alimentées lors de leur travaux de nuit. ». De plus, cette estimation fonctionne de manière imprécise puisqu'elle se base sur l'hypothèse que « si une maison dans un bloc possède de la lumière, l'ensemble du bloc est alimenté ». De cette manière la seconde estimation, passe de 2 000 à 25 000, puis à 35 000 pour finir par atteindre le chiffre de 100 000 personnes coupées.

L'impossibilité de détecter précisément certaines coupures électriques à des échelles fines est donc aussi une question relative à l'équipement technologique et au coût économique de ces technologies ; on peut d'ailleurs imaginer qu'à long terme, le déploiement futur des « compteurs intelligents » à l'échelle individuelle pourrait transformer ce rapport à l'imprécision. Ces « compteurs intelligents » pourraient même transformer plus profondément les coupures électriques, puisque dans le cadre de l'optimisation des délestages volontaires, des chercheurs travaillent actuellement sur le fait de maintenir une partie minimum d'énergie en fonction des besoins individuels et de ne délester l'énergie qu'affectée à certains types de tâches (Lu, 2009).

Néanmoins cet exemple, qui est bien sûr un cas « extrême » d'erreur d'estimation, porte davantage sur « l'état » des équipements et des sous espaces qu'ils desservent que sur la délimitation de ces sous espaces en elle-même. Il traduit le fait que l'état des équipements « finaux » dans l'ensemble du système d'approvisionnement électrique des territoires n'est pas forcément connu en temps réel. Plus on va descendre dans la hiérarchie du réseau, en allant donc d'une petite vers une petite échelle, moins il sera possible en cas de panne de connaître l'état de l'équipement électrique avec fiabilité à partir d'un système à distance. En revanche, en termes de limite spatiale, le problème se pose différemment et on peut même penser que le problème aurait tendance à s'inverser. Par exemple, on peut délimiter assez

certainement à une échelle très fine qu'un coffret de distribution situé dans un immeuble, alimente cet immeuble ; en revanche, délimiter précisément l'ensemble des postes de distribution qui dépendent d'un poste source et l'aire de dépendance, implique davantage d'incertitude, et justifie le recours à une imprécision spatiale artificielle.

Fuzzyfication et intégration de l'imprécision spatiale artificielle

Dans (Fenwick, al., 1998), les auteurs présentent une méthode d'analyse des zones de services associées aux postes électriques en s'appuyant sur les automates cellulaires. La méthode reste fortement basée sur la notion de distance entre les postes, mais permet comparativement aux méthodes présentées précédemment de pouvoir intégrer des informations sur l'occupation du sol, auxquelles est associé un profil de consommation. La méthode intègre donc un nouvel élément pour gagner en exactitude spatiale de la délimitation mais introduit, pour cela, une forme d'imprécision et de généralisation par l'association « type d'occupation du sol » / « profil de consommation électrique » et par la définition des règles de fonctionnement de l'automate cellulaire.

Pour ces auteurs, un autre intérêt de cette méthode, comparativement aux méthodes classiques basées sur les diagrammes de Voronoï, est de permettre d'associer à chaque cellule un degré de certitude sur son appartenance à un sous-ensemble plutôt qu'à un autre. Néanmoins, « logiquement, une sous-station a de fortes possibilités de desservir les cellules qui lui sont proches. (…). L'incertitude augmente au fur et à mesure que les cellules approchent des limites des zones de services. » (Fenwick, al., 1998). Cette observation témoigne d'une part, de la variabilité spatiale de l'incertitude sur la structure spatiale induite par les réseaux électriques, mais également d'une tendance de l'incertitude à se concentrer dans les espaces soumis à des polarités moins nettes et plus diversifiées.

En considérant différentes méthodes associées aux espaces flous, nous essaierons, sans avoir recours aux techniques d'automates cellulaires, d'introduire une logique identique d'incertitude et d'imprécision spatialisée. L'idée étant de considérer que compte tenu de la primauté du facteur espace-distance sur le facteur occupation du sol dans la délimitation de ces zones (en particulier en milieu strictement urbain), il est peut être envisageable d'introduire le flou directement sur les objets spatiaux obtenus à partir de méthodes statiques, plutôt que de passer par un modèle plus dynamique, plus complexe, fondé sur plus de données, mais introduisant inévitablement, de ce fait, d'autres formes d'imprécision et de généralisation (liées notamment au passage de la densité à un niveau de consommation électrique ou encore aux passages d'informations statistiques zonales à une information cellulaire en grilles).

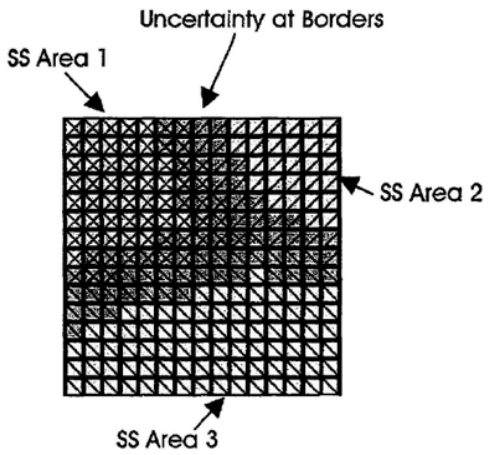


Figure 29 : Incertitude des limites de services dans l'automate cellulaire sur les bassins de dépendances électriques (Fenwick, al., 1998).

En partant de la logique réticulaire de la méthode en 3.3.2., et de la logique plus aréale de la méthode en 3.3.3., on peut envisager au moins deux stratégies pour implémenter cette imprécision spatiale.

Dans le cadre de réseaux hiérarchisés, soit u(A), un petit nombre de nœuds en amont, qui alimente u(B) un grand nombre de nœuds, en aval, nous disposons d'une distance réticulaire de chaque nœud de réseau A vers chaque nœud de réseau B, à partir de la technique décrite en 3.3.2. Il est alors possible de concevoir le rapport de chaque nœud au nœud supérieur comme une relation de pluri-appartenance. Chaque nœud du réseau B peut dépendre de plusieurs nœuds du réseau A selon la distance de Delaunay qui l'en sépare. Pour plus de détails et des applications de cette logique de flou à d'autres thématiques liées aux réseaux, on pourra se référer, notamment, à l'application sur l'accessibilité routière et les aires d'influences des services de maternité dans (De Ruffray, Hamez, 2009).

Nous présenterons succinctement deux règles envisageables :

1. Pour chaque poste du réseau u(B) on considère les 2 (ou plus) postes u(A) pour lesquels la distance est moindre. Ce nombre peut par exemple varier en fonction d'analyse plus précise de la distribution statistique des distances d'accès. On peut aussi considérer, par exemple, que, dans le cas où la distance de Delaunay d'un nœud B au nœud A le plus proche est inférieure de plus de deux fois à la distance de Delaunay au second nœud le plus proche, alors ce nœud B appartient exclusivement à un seul nœud A (mono-dépendance) alors que les autres seront définis en termes de pluri appartenance.

2. Dans une logique de pluri-appartenance totale (chaque poste de u(B) dépend partiellement de l'ensemble des postes de u(A). On sort un peu de la logique initiale qui consistait à concentrer l'imprécision spatiale sur les bordures des zones, de manière à postuler une potentielle dépendance totale de l'ensemble du système à chaque poste u(A) pris individuellement. Le niveau d'appartenance est alors relatif à l'inverse de la distance entre les postes.

Dans le cas des diagrammes de Voronoï pondérés, nous ne nous appuierons pas directement sur le réseau mais plutôt sur les notions de franges spatiales et de limites floues. La logique est d'utiliser les frontières des diagrammes en considérant que les sous-espaces sont, en termes de délimitations, plus certains au centre de la forme que sur les bordures de celle-ci. Les limites des objets spatiaux vont donc s'estomper et devenir des espaces imprécis tandis que persisteront des noyaux de certitude. Néanmoins, de la même manière que dans les autres méthodes d'estimations par noyaux, il reste délicat de justifier les règles attribuées à la diminution des valeurs d'appartenance en fonction de la distance au centre (paramètre de lissage). Dans une méthode comme dans l'autre, même si plusieurs alternatives sont envisageables, on peut retrouver la logique de considérer l'imprécision comme étant inégalement répartie dans l'espace, avec également une tendance à se concentrer dans les espaces soumis à des polarités moins nettes. Il est également envisageable d'introduire par la notion de pluri-appartenance spatiale, une logique de dépendance totale du système spatial à une seule entité ponctuelle.

Nous avons envisagé différentes méthodes à l'échelle du réseau technique, permettant de délimiter les rapports d'interdépendances verticaux du réseau électrique. Celles-ci sont bidirectionnelles puisque si un poste en amont est impacté, il impacte les réseaux afférents, tout comme des dommages sur le réseau de distribution peuvent, sous certaines conditions, conduire à des dysfonctionnements au niveau du réseau de transport, nous parlions dans (Voiron, al., 2007) de réciprocité local-global des interactions scalaires dans les systèmes de risques. Ces conditions restent pour le moment à définir, les approches rétrospectives des chapitres suivants contribueront à les préciser.

Nous avons envisagé dans cette sous-partie la criticité, comme étant liée aux chaînes d'impacts possibles à l'échelle du réseau électrique en considérant ce dernier comme un réseau multi-niveau. A l'échelle des réseaux techniques, de nouveaux niveaux d'organisation et de différenciation spatiale des impacts apparaissent et se combinent aux autres dans la production de la dynamique spatiale des systèmes de risques.

3.3.4. Estimation de la criticité a l'échelle du réseau technique

3.3.4.1. Les interdépendances des réseaux techniques et leurs évolutions. Vers l'arme réseau ?

Il existe de nombreux scénarios envisageables dans lesquels un type de réseau technique serait susceptible d'impacter un autre type de réseau. En cherchant à quantifier les interdépendances des réseaux, on trouve parfois une certaine confusion liée au fait que la désignation d'une interdépendance forte entre deux réseaux peut signifier tout autant, que :

- l'impact d'un dysfonctionnement sur un type de réseau A engendre fréquemment un dysfonctionnement sur un autre type de réseau B. Ou l'inverse, ou les deux.

- L'impact d'un dysfonctionnement sur un type de réseau A engendre un dysfonctionnement grave ou de grande ampleur sur un autre type de réseau B. Et réciproquement. Ou l'inverse, ou les deux.
- L'impact d'un dysfonctionnement sur un type de réseau A engendre un dysfonctionnement sur un autre type de réseau B dont les conséquences sont particulièrement graves en termes sociétal et particulièrement au niveau de la sûreté des populations, par exemple.

Dans la mesure où nous avons clairement distingué, auparavant, les questions de dépendances sociétales aux services fournis par les réseaux, et celles des dépendances et interdépendances des réseaux liées à l'organisation de l'infrastructure technique, nous considérons donc qu'une interdépendance forte à l'échelle de deux réseaux techniques, renvoie à une forte possibilité qu'un dommage sur un type de réseau, engendre un impact important sur un autre type de réseaux, qui peut, elle aussi, engendrer le même type d'impact. Par nature, ces interdépendances ne sont pas statiques et évoluent dans le temps. Les interdépendances du réseau électrique et des réseaux internet en constituent un exemple frappant, dont les enjeux en termes de sécurité sont d'ailleurs pris très au sérieux par les autorités.

Sur la thématique de la vulnérabilité des infrastructures électriques à une attaque informatique, il existe un voile de fumée important et une incertitude forte qui tient notamment aux aspects parfois non officiels, peu diffusés et souvent peu vérifiables des informations dont on va pouvoir disposer. Aux prémices de cette recherche, rien ne permettait réellement d'affirmer que ce type de scénario était impossible ; aujourd'hui, certains éléments et évènements permettent d'affirmer que ce scénario est tout à fait envisageable mais reste encore extrêmement peu évaluable en termes d'impacts globaux, d'ampleur et de possibilités de réalisations.

Un rapport du NERC (North American Electric Reliability Corporation) sur les risques « à faible fréquence et fort impact» dans le réseau électrique américain est explicite sur ce point : « le risque d'une attaque cybernétique, physique ou mixte, coordonnée contre le réseau de transport électrique nord-américain est devenu plus important au cours des 15 dernières années, au fur et à mesure que les équipements de communication digitale ont introduit une vulnérabilité cybernétique au système et que l'optimisation des échanges de ressources a conduit à réduire la redondance physique de certaines composantes à l'intérieur du système. Un aspect particulier de ces faiblesses vient du fait que l'endommagement, la destruction ou l'interruption de manière coordonnée et ciblée de certains nœuds clefs du système, peuvent conduire le système en dehors des limites couvertes par les plans de protection traditionnels et les normes opérant habituellement sur ses questions. » (NERC, 2010).

Ce qu'on a appelé dans les médias « la première cyberguerre », menée *a priori* par la Russie contre l'Estonie en mai 2007, avec une mise hors service de nombreux sites internet gouvernementaux, bancaires ou commerciaux a clairement montré qu'il était possible de déstabiliser un pays fortement dépendant, à partir d'une attaque de certains nœuds du réseau internet, sans pouvoir mettre en cause clairement et certainement un ou des responsables de cette attaque. Plus récemment en 2010, le virus Stuxnet a quant à lui, montré qu'il était possible d'infecter l'info-structure des infrastructures vitales et même de détruire physiquement ces dernières en reprogrammant certains de leurs fonctionnements. Dans ce

dernier cas, la propagation du virus repose, certes, sur une diffusion par un support physique (typiquement une clef usb) plutôt qu'une infection par le réseau internet, mais montre qu'une vulnérabilité de l'info-structure d'une infrastructure critique est peut-être plus complexe à gérer que la vulnérabilité de l'infrastructure en elle-même.

D'autre part, on peut souligner que d'après les experts de Symantec, spécialistes en sécurité informatique, plus de 60% des ordinateurs ciblés par Stuxnet étaient localisés en Iran, ce qui a largement accrédité l'hypothèse que l'infection dans l'info-structure de la centrale nucléaire de Natans dont les centrifugeuses ont été détruites, ne reposait peut être pas sur une intrusion physique pour implanter le virus dans la station, ou sur un sabotage. L'hypothèse proposée est que la stratégie de diffusion reposerait peut être en deux phases avec une sorte de pré-diffusion à large échelle du virus en Iran (qui expliquerait pourquoi 60% des cibles étaient localisées dans ce pays), puis une diffusion à micro échelle par les supports de transfert de données comme les clefs usb, jusqu'à ce qu'une personne, par une négligence anodine, infecte involontairement un ordinateur relié à l'intranet d'une centrale en ne respectant pas une règle du protocole de sécurité informatique. La logique serait donc de « viser large » pour impacter indirectement une cible précise qui serait le véritable enjeu du virus. Pour d'autres experts et certains journalistes, en s'appuyant sur les mêmes éléments, la logique et le modèle de diffusion évoqués fonctionnent exactement dans le sens inverse, et il est effectivement tout à fait possible que Stuxnet soit au départ un virus implanté spécifiquement dans la centrale de Natans, qui s'en serait ensuite « échappé », extrait de la centrale par erreur d'un ingénieur, puis diffusé de proche en proche sur le sol iranien et finalement à l'échelle de l'ensemble du réseau mondial.

Depuis les années 2010-2011, les piratages supposés des systèmes SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) utilisés, entre autres, dans la gestion des réseaux d'eaux, des flux électriques ou des centrales nucléaires connaissent et induisent de nouveaux cadres de références, qui, même s'ils restent assez confus, confirment la citation précédente de la NERC. Ils mettent en lumière de nouvelles interdépendances, ou des interdépendances mieux optimisées par ceux qui souhaitent les utiliser dans des logiques de déstabilisation ou de destruction. Pour plusieurs experts, ces dernières années ont transformé des théories et fictions sur la possibilité d'un endommagement physique des infrastructures techniques par le biais du cyberespace en véritable menace. Pour d'autres, l'idée que le système SCADA d'un réseau électrique, d'un pont ou de lignes ferrées puisse fonctionner sur un poste connecté, même de manière très indirecte à un réseau internet, reste une hypothèse peu crédible sans de très importantes négligences rompant par exemple l'isolation entre le réseau de machines bureautiques et le réseau industriel de contrôle de commande.

On voit donc que certaines interdépendances du système technique sont à la fois évolutives et incertaines dans leur existence, leur intensité et leur fonctionnement. Celles liées aux réseaux internet sont évidemment un cas particulier, compte tenu du caractère plus récent de ces réseaux ; d'autres types d'interdépendances sont plus nets à identifier.

3.3.4.2. Modélisation des interdépendances du réseau technique

Nous considérons exclusivement des systèmes de risques dont l'impact initial porte sur la composante électrique, ainsi pour en déduire les impacts possiblement induits à l'échelle du réseau technique, la question de la dépendance électrique des autres types de réseaux est déterminante. Dès 2006, un état des recherches sur les expériences de modélisation des infrastructures critiques et des défaillances en cascade dans ces systèmes faisait état de près d'une trentaine d'applications essentiellement américaines, achevées ou en cours de développement (Pederson, al., 2006). Plus récemment, (Satumtira, Duenas-,Osorio, 2011) proposaient une impressionnante synthèse bibliographique basée sur plus de 160 références sur l'interdépendance des infrastructures critiques qui montrait, entre autres, que cette thématique constitue un enjeu récent et de plus en plus important pour la communauté scientifique.

Les outils et méthodes présentés sont tournés vers la théorie des graphes, les réseaux bayésiens (Duenas-Osorio, 2007, Buxton, al. 2010) ou encore les systèmes multi-agent avec en particulier la plateforme CIMS pour Critical Infrastructure Modeling System (Dudenhoeffer, 2006), et tentent à partir d'une approche probabiliste des rapports d'interdépendances que peuvent entretenir les composantes des systèmes techniques à l'échelle de plusieurs types de réseaux de simuler le comportement dynamique d'un système réticulaire hétérogène en cas d'endommagement d'une ou plusieurs de ses composantes et même pour certains, d'envisager d'optimiser la protection en termes d'organisation du réseau (CIMS).

Il existe plusieurs versions de matrices d'interdépendances des infrastructures critiques, elles peuvent être plus ou moins élaborées, plus ou moins désagrégées mais les experts s'accordent à considérer que le fonctionnement du réseau électrique possède un impact important sur le fonctionnement des autres réseaux ; alors qu'en retour, les dysfonctionnements de ces autres réseaux possèdent un impact plus faible sur le fonctionnement du réseau électrique. Dans le tableau 3, la matrice repose sur le jugement d'experts, on voit que la dépendance électrique des autres infrastructures appartient à la catégorie forte alors qu'en termes de dépendances aux autres infrastructures, le système électrique semble plus faiblement dépendant.

Ce constat justifie en partie notre choix d'analyser en amont l'endommagement électrique. La matrice met également en avant le caractère évolutif du système électrique puisque trois cases sont représentées par une transition de couleur (vitesse de transformation ; système de contrôle de l'infrastructure ; degré de libéralisation), ce qui comme nous l'avons montré, participe à la faible prévisibilité et à la créativité des systèmes de risques liés à l'endommagement des systèmes de risques. On note aussi que la criticité (désignée ici en termes d'échelle, de magnitude et d'effet de la durée), est plus importante dans les réseaux électriques que dans les autres types de réseaux. Le réseau électrique possède donc des indices forts en termes de vulnérabilité, d'interdépendance et de criticité.

Le réseau d'infrastructure de télécommunication possède également un profil avec des interdépendances marquées : une forte dépendance aux autres réseaux (surtout au réseau électrique), tout en étant fortement nécessaire pour le fonctionnement ces autres réseaux (par

exemple pour la gestion du réseau électrique). Ses impacts possèdent également une forte criticité en termes d'échelle et de magnitude mais ne sont pas aggravés par leur durée autant que peuvent l'être une coupure électrique. Comparativement, les réseaux de distribution d'eau ou de gaz semblent moins impliqués dans ce tissu d'interdépendances et possèdent des impacts d'une moindre criticité.

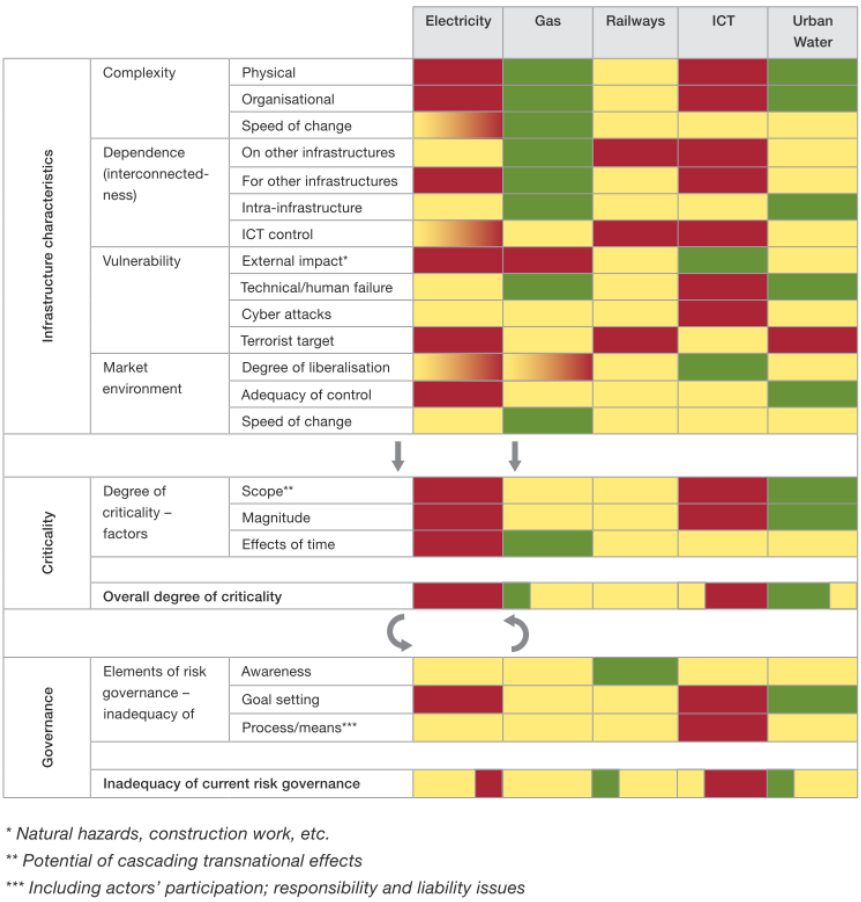


Tableau 3 : Estimation de la vulnérabilité des infrastructures critiques (Source : IRGC 2006).

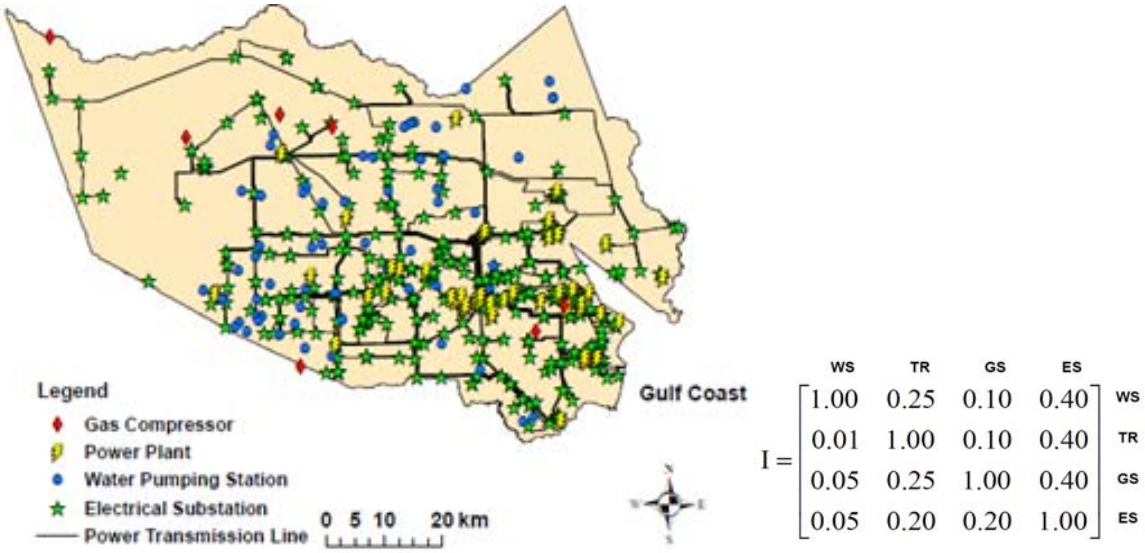
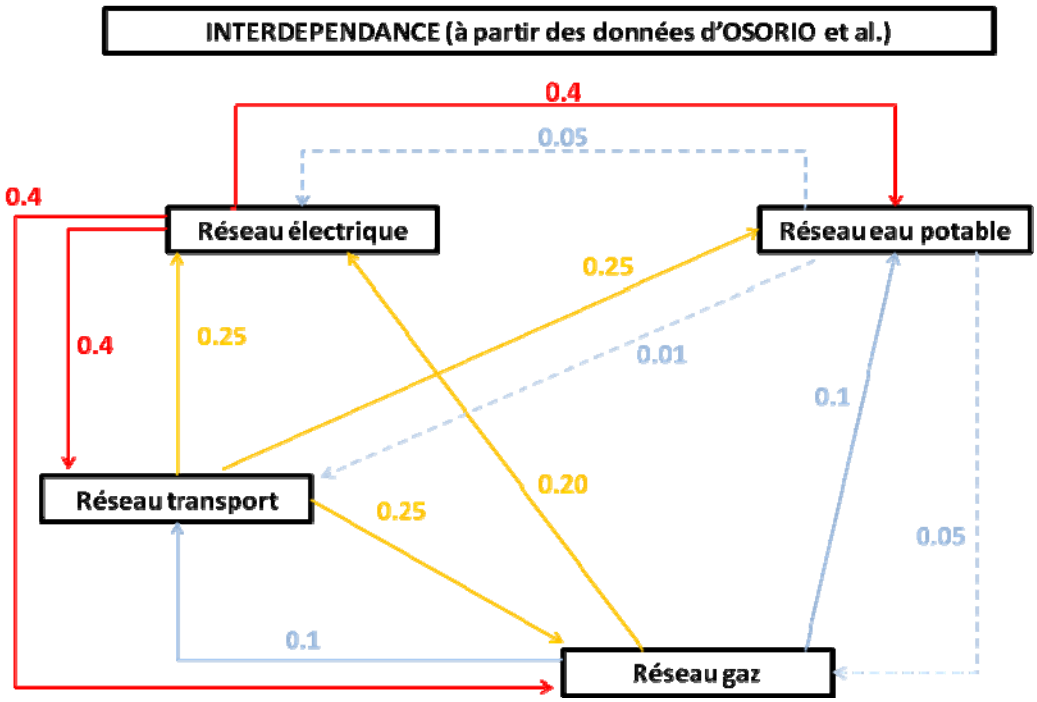


Figure 30 : Réseaux techniques du comté de Shelby et matrice d'interdépendance des réseaux associée (Winkler, Duenas Osorio, al., 2010).

D'autre part, des matrices d'interdépendances plus précises et détaillées sont également envisageables et même indispensables dans une logique d'analyse probabiliste (figure 30). Dans cette logique, l'analyse menée sur le comté de Shelby dans le Tennessee (Winkler, Duenas Osorio, al. 2010) propose en exemple, une matrice d'interdépendance entre chaque type de réseau avec une distinction entre l'effet subi et l'effet induit pour chacun d'eux. Par exemple, le réseau électrique possède un impact de 0.4 sur l'ensemble des autres réseaux (40% de chances que la coupure d'une zone engendre un endommagement sur une composante d'un autre réseau compris dans cette surface). Par contre, il est dépendant à seulement 0.05 du réseau d'eau et 0.2 du réseau routier et de gaz, ce qui confirment les éléments de la figure et le caractère plus critique que vulnérable (en termes d'interdépendance) du système électrique. On pourra en revanche souligner les « divergences » sur les interdépendances du réseau de gaz.

La logique des probabilités implique à un moment ou un autre d'introduire une quantification précise de la possibilité de passage d'un dommage, d'une structure vers une autre structure. On comprend assez facilement que cette attribution est délicate et ne peut se baser que sur un raisonnement logique ou une observation très ponctuelle puisqu'il n'y a pas de bases rétrospectives exhaustives sur ces évènements (et encore moins sur ces non évènements pour les cas où la panne n'induit pas d'impact en amont). Il y a donc une tendance à introduire des chiffres précis pour des notions qui restent assez floues et ne trouvent pas de justification empirique.

Par exemple, si on reprend plus graphiquement la matrice des probabilités précédentes, on peut voir en fait la distinction plus simple et moins précise, entre quatre grands degrés de probabilités d'interdépendance : fort probable, pour la criticité du réseau électrique avec des flèches représentées en rouge, probable, pour les réseaux de transport dont les flèches sont jaunes, faiblement probable, pour les bleues et très faiblement possible, pour les bleues en pointillés qui concernent exclusivement les impacts des réseaux d'eau potable sur les autres réseaux. En effet, si l'on peut envisager une grande diversité de scénarios où les endommagements des réseaux électriques impactent le fonctionnement des autres réseaux, les scénarios où le réseau d'eau potable, impacterait directement un autre type de réseau, sont bien plus difficiles à envisager. En reprenant la logique de ratio entre dommage subi et transmis par type de réseau technique (Zimmerman, 2004), on voit donc que le réseau électrique a une tendance à être davantage impactant qu'impacté (2,6) alors que le réseau d'eau potable aurait une dimension impacté très forte (0.75) mais une dimension critique proche de 0.



	Impactant (criticité)	Impacté (susceptibilité)	Ratio
Réseau électrique	1,2	0,455	**2,6**
Eau potable	0,011	0,750	**0,01**
Transport	0,75	0,510	**1,5**
Gaz	0,4	0,655	**0,6**

Figure 31 (a) : Représentation graphique des interdépendances de la matrice probabiliste de la figure 30 et (b) estimation des ratios impactant/impacté des réseaux techniques.

	Impactant (criticité)	Impacté (susceptibilité)	Ratio
Réseau électrique	12	14	**0,9**
Eau	34	10	**3,4**
Transport	25	18	**1,4**
Gaz	19	36	**0,5**

Figure 31 (c) : Ratios impactant/ impacté d'après les observations de (Zimmerman, 2004).

Même si la matrice proposée dans la figure 30 est présentée comme un exemple et non un modèle universel, on peut envisager si ce n'est une comparaison, au moins une mise en perspective du tableau précédent avec les résultats obtenus empiriquement par (Zimmerman, 2004). Celle-ci met en lumière une importante distorsion entre la matrice probabiliste et les observations, par exemple sur la place du réseau de canalisations d'eau. Cette distorsion s'explique en partie par le fait que dans le premier cas, le réseau d'eau ne concerne que le

réseau potable, alors que dans le second, il concerne l'ensemble des canalisations d'eau indistinctement (eau potable, eaux usées).

Concernant le réseau électrique, les observations empiriques laissent penser que la dépendance de ce réseau vis-à-vis d'autres réseaux techniques est plutôt sous-estimée dans le modèle probabiliste. Une différence notable également vient du fait que la matrice probabiliste est surtout construite dans l'optique d'évaluer des dysfonctionnements techniques indirects alors que l'approche empirique inclut davantage la notion d'endommagement physique d'une infrastructure par une autre. Enfin, précisons que les résultats du tableau 31(c) sont un extrait, et d'autres types de réseaux ou d'infrastructures dans l'analyse de départ présentée au chapitre 1 (figure 14), ne sont pas repris (ce qui explique aussi pourquoi la somme des « impactés » est différente de celle des « impactants »).

Compte tenu de ces incertitudes, nous adopterons une logique approximative pour l'anticipation des interdépendances des réseaux techniques et reprendrons la distinction entre quatre grands niveaux de possibilités telles que définis en figure 31. Envisager les interdépendances des réseaux conduit, quelle que soit l'intensité supposée de ces interdépendances, à une aggravation assez nette du risque d'endommagement de chacun d'eux en cas de perturbation externe. Dans la figure 32, les courbes de fragilité pour les réseaux d'électricité, d'eau, de transport et de gaz, sont construites, avec et sans prise en compte de cet effet « interdépendance ». Le décalage très net des courbes vers la partie gauche du graphique témoigne de cet effet d'interdépendance : une perturbation d'intensité moins importante est nécessaire pour un même degré de probabilité d'endommagement d'une infrastructure.

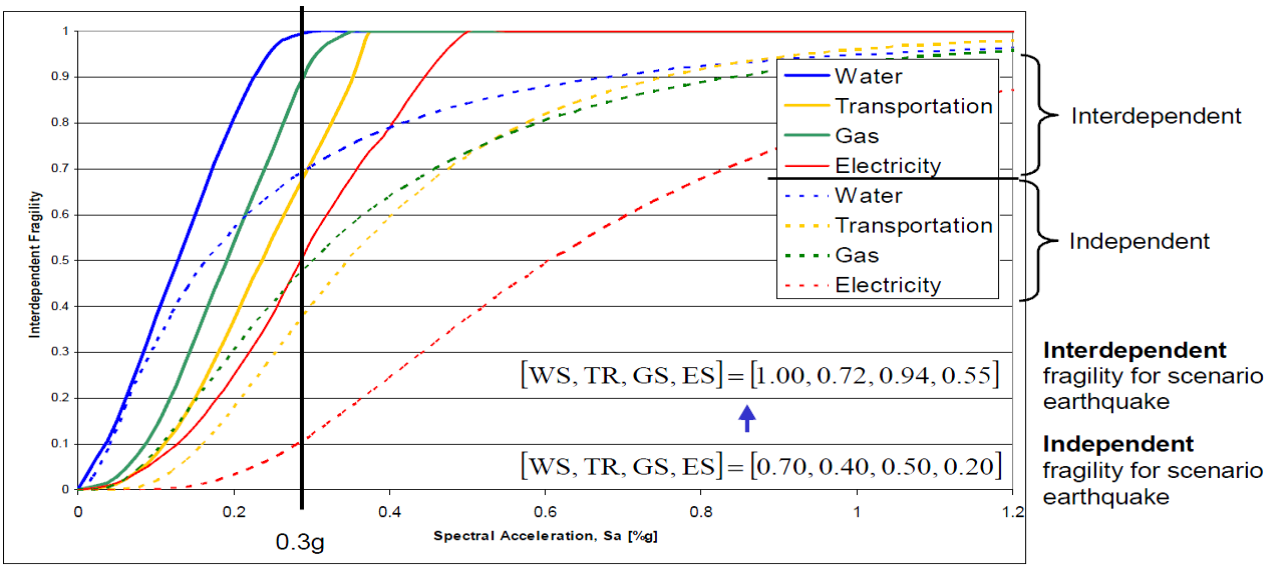


Figure 32 : Courbes de fragilité des réseaux techniques aux perturbations sismiques avec et sans prise en compte des interdépendances entre les réseaux (Source : (Winkler, Duenas Osorio, al., 2010).).

3.4. LA RÉSILIENCE, DURÉE DE RESTAURATION DU SERVICE ET DE RESTABILISATION DU FONCTIONNEMENT TERRITORIAL

Comme souligné dans le chapitre 2, la résilience est prise en compte dans une définition assez simple fondée sur la dimension temporelle et la notion de durée de retour d'un sous-système à un état de fonctionnement normal. Dans notre cas, nous nous intéressons plus spécifiquement à la restauration du service électrique puisque la question de la durée de la coupure est bien sûr un facteur aggravant qu'il est indispensable de prendre en compte ; aussi, chacune des analyses de la partie 2 s'attache à décrire à la fois la dimension spatiale et la dimension temporelle des évènements analysés. D'autre part, nous verrons que les interdépendances des réseaux techniques nécessitent également cette prise en compte du temporel pour plusieurs raisons.

D'abord, nous verrons dans le chapitre 4 avec le cas de la tempête de neige dans le département du Var, qu'un ou plusieurs impacts sur le réseau routier peuvent sans endommager directement le réseau électrique, contribuer à aggraver la durée de la coupure électrique. Il y a donc bien une interdépendance entre l'état ces deux réseaux qui n'apparaît pas au moment du déclenchement du système de risque, mais qui s'affirme progressivement au cours de la gestion de crise.

De même, certaines ressources sont stockables avec plus ou moins d'efficacité (eau, batterie électrique, nourriture), d'autres sont substituables (générateur électrique de secours), d'autres sont négligeables pendant une durée qui varie selon les personnes, mais par nature, ces stocks, ces substituts ou ces tolérances disposent d'une autonomie limitée qui se définit en termes de durée. Aussi, tout au long de la panne électrique, de nouveaux impacts indirects peuvent apparaître, dans le cas du chapitre 4, des risques et des situations de ruptures d'approvisionnement en eau potable n'apparaissent pas immédiatement mais au bout de plusieurs heures de coupures électriques. On peut à nouveau parler d'effets latents. Ces derniers justifient un intérêt important à la temporalité des systèmes de risques.

La résilience est l'opportunité d'introduire cette dimension temporelle comme nous l'avions souligné dans le chapitre 2. La rétroaction possible de l'endommagement des réseaux routiers et donc de l'accessibilité sur la possibilité de restauration du service électrique sera considérée de manière privilégiée. Cette interdépendance est assez recevable dans la mesure où l'inaccessibilité d'une zone est un facteur critique pour la restauration du service électrique et va donc conduire à une aggravation importante de la durée de la panne. Sans aller jusqu'à l'inaccessibilité complète et l'endommagement d'une partie de l'infrastructure routière, la variabilité spatiale de l'accessibilité peut suffire à elle seule à justifier des différenciations en termes de restauration du service électrique. Un poste très éloigné du point de départ des services de réparation a plus de chance d'être secouru plus tard qu'un poste situé très proche. Ce qui malgré un caractère généralisant, reste une hypothèse plausible.

Les modèles de prédiction de restauration du service électrique (et donc de durée d'une panne) peuvent fonctionner sur des règles simples qui reflètent, dans un contexte de possibilités limitées, une stratégie de restauration simple comme l'idée que la restauration

électrique va prioritairement se focaliser sur les infrastructures dont dépendent le plus de monde, et l'ordre de priorité va ensuite décroître en fonction de la masse de population ou d'entreprises rattachées à l'infrastructure endommagée. D'autres facteurs spatiaux (le niveau d'endommagement du poste, son accessibilité) et des facteurs généraux comme le nombre d'équipes disponibles, le nombre total de postes endommagés pendant l'évènement, influent bien sûr très fortement sur cette durée de restauration du service, et leur prise en compte s'avèrerait sans doute pertinente dans une logique d'anticipation. Comme nous l'avons déjà souligné, la résilience est abordée de manière simple et il ne fait aucun doute qu'elle reste une dimension à préciser et à améliorer dans notre tentative d'anticipation des systèmes de risques et de détection des espaces à enjeux. Les analyses rétrospectives du chapitre 4 et 6 permettront de préciser cette compréhension des dynamiques temporelles des systèmes de risques et les enjeux associés à la durée des coupures électriques.

3.5. LA DÉPENDANCE SOCIÉTALE AUX RÉSEAUX TECHNIQUES ET L'IMPACT TERRITORIAL DES SYSTÈMES DE RISQUES DE COUPURES ÉLECTRIQUES

De nature à la fois spatiale, réticulaire et sociétale, les concepts de dépendance et d'interdépendance occupent une place centrale dans la problématique des systèmes de risques. Cette centralité est tout à fait logique puisque la recherche porte en partie sur la question « d'effets de réseaux » (fondamentalement un réseau possède au moins deux composantes) et que nous avons défini les systèmes de risques comme étant au cœur des interdépendances espace-réseau-société. La question de la dépendance est multiforme. Même à la seule échelle du système technique, lorsqu'on analyse les possibilités d'effets dominos entre plusieurs réseaux, la question initiale est bien de savoir si un réseau est plus ou moins dépendant d'un autre réseau. Aussi peut-on considérer que la question de la dépendance est en quelque sorte sous-jacente dans l'ensemble des estimations précédentes, qu'il s'agisse de la susceptibilité, de la criticité et même de la résilience.

Nous avons souligné dans la sous-partie sur la criticité que « Si l'on associe l'idée de criticité à l'idée de gravité, cela justifierait également d'intégrer à l'analyse de la criticité, l'analyse des impacts sociétaux des dysfonctionnements techniques. Toutefois, à l'échelle de nos systèmes de risques, il nous est apparu opportun de dissocier clairement deux éléments qui sont tous les deux déterminants pour caractériser la gravité d'une coupure électrique mais qui ont des implications très différentes en termes de dynamique spatiale du système de risque. ». Il nous faut donc préciser à ce stade comment sera envisagée la dépendance sociétale et en particulier comment sera prise en compte la variabilité de cette dépendance.

La première distinction essentielle s'établit entre les lieux d'activités (industriels, commerciaux ou administratifs) et les lieux de résidences. Elle est établie pour au moins trois raisons :

- L'impact différent de la coupure électrique.
- Le raccordement différent aux réseaux électriques (nous y reviendrons au chapitre 5).

- L'influence de cette distinction dans la mobilité quotidienne, la localisation des individus peut varier d'un endroit à l'autre dans le temps (weekend et soir en lieu de résidence ; journée de semaine sur son lieu d'activités) ce qui possède une influence sur le nombre de clients coupés en fonction du jour et de l'heure de la coupure.

Pour établir cette distinction, nous nous appuierons dans le chapitre 5 sur la classification des bâtis telle que proposée dans la BD Topo de l'IGN. Ainsi, nous pourrons en déduire après différents traitements, d'une part, une estimation de la quantité de population résidente potentiellement associée à chacun des postes électriques de différents niveaux du réseau, et une estimation des possibilités de rattachement des principales activités économiques, d'autre part. Pour la population résidente, il est également envisageable de connaître le nombre de personnes d'une classe d'âge spécifique pour qui on suppose que la coupure électrique est plus pénalisante que d'autres (en particulier les enfants en bas âge ou les personnes âgées isolées). Cette première information reste toutefois assez générale et correspond à des enjeux zonaux.

Nous abordons alors un autre aspect de notre approche des systèmes de risques qui consiste à porter une attention particulière et ciblée aux populations et activités dont on soupçonne une dépendance accrue pouvant aller jusqu'à la dépendance vitale. Ces composantes sont donc des enjeux ponctuels, des cibles finales du système de risque, qu'on arrive à localiser précisément. A partir de cette localisation précise des cibles, il s'agit d'identifier les sources dont on sait avec plus ou moins de certitude que les cibles sont dépendantes (par exemple les postes électriques), ce qui permet d'établir des trajectoires à enjeux pour l'anticipation des dommages indirects d'une inondation par exemple (chapitre 5).

Dans la toute première phase de cette recherche, nous avions travaillé en Master 2 sur une « Réflexion méthodologique sur la vulnérabilité sanitaire des territoires et des populations. » (Dutozia, 2005) appliquée à la ville de Nice. Cette recherche envisageait plusieurs protocoles de recueil de données visant à identifier de manière plus ou moins précise des individus vulnérables. Par la suite, au cours d'un stage de plusieurs mois au Centre Hospitalier Universitaire de Nice (CHUN), nous avions pu assister à la construction d'une grille de détection des populations vulnérables visant à identifier des individus remarquables pour leur fragilité et également pour leur dépendance à l'électricité. Cette connaissance à l'échelle de l'individu, croisée aux périmètres de différents aléas permettant de proposer une sorte de prévention « ciblée » pouvant par exemple s'appuyer sur des messages d'alerte par texto en cas d'alerte météorologique comme c'est le cas dans le prototype GéoSamu réalisé en 2005 en collaboration entre l'UMR ESPACE 6012, le CHUN et le SAMU 06 (Domergue, al., 2005).

Dans le cadre de nos applications, nous ne disposons d'aucune donnée à l'échelle d'un seul individu, aussi ne se pose pas de problème d'anonymat ou de confidentialité dans les documents présentés dans la partie 2. Pour autant, nous considérons tout de même plusieurs enjeux ponctuels pour lesquels on présume que la dépendance électrique induit des impacts potentiellement vitaux en cas de rupture d'approvisionnement. Ainsi, dans l'application sur l'organisation des interdépendances verticales entre les postes électriques et le système urbain marseillais, nous avons au préalable, localisé à partir de leurs adresses et d'images aériennes,

l'ensemble des hôpitaux et des maisons de retraite à l'échelle de chaque bâtiment. Nous pouvons alors identifier quels sont parmi ces enjeux ponctuels ceux qui, bien que non inclus dans un périmètre inondable, seraient tout de même susceptibles d'être impactés par le système de risque inondation en cas d'endommagement d'un ou plusieurs postes électriques inondables. Nous désignons alors ces composantes comme les enjeux de dépendance du système de risques.

	POSTE SOURCE A	**POSTE SOURCE B**
Surface zone de dépendance	1,137 km²	0,863 km²
Nombre de postes niveaux inférieurs	96	74
Nombre total de bâtiments dépendants	3218	1899
Nombre total de bâtiments résidentiels	2856	1563
Nombre de résidents	7479	3962
Enjeux ponctuels de dépendance (Hopitaux, maison de retraite)	3	1
Enjeux critiques pouvant induire nouveaux effets dominos (Pompe réseau eau, Antenne radio ou télecom)	0	1

Figure 33 : Extrait d'informations associées aux postes source en amont du système électrique dans le cas de Marseille.

CONCLUSION

Ce troisième chapitre a mis en exergue l'importance des problématiques d'incertitude et d'imprécision spatiale dans une logique rétrospective et une logique anticipative des systèmes de risques. Du fait de l'indétermination des trajectoires et de l'effet de surprise des systèmes de risques, nous adoptons une posture plutôt sceptique sur la connaissance possible des systèmes de risques, des espaces à enjeux et des effets de réseaux.

Aussi, les méthodes d'estimation des propriétés SCReD s'attachent donc de manière privilégiée à prendre en compte imprécision, incomplétude et incertitude, et envisagent d'identifier des systèmes de risques flous dans des espaces géographiques flous. Les enjeux théoriques et méthodologiques de cette logique sont également précisés à la suite de la présentation générale menée au chapitre 2. Compte tenu du contexte de cette forte incertitude, la justification et les principes du passage d'une logique probabiliste de détection des espaces à enjeux dans les systèmes de risques à une logique possibiliste sont également établis.

D'autre part, les enjeux de hiérarchie et d'imbrications déjà évoqués dans les deux chapitres précédents sont également au centre des démarches d'estimation de la susceptibilité et de criticité. Dans le premier cas, l'imbrication est liée au traitement et à la fusion d'informations spatiales incomplètes, hétérogènes, incertaines et imprécises en entrée du modèle. Dans le second, elle est davantage liée à la variabilité et l'incertitude des interdépendances spatioréticulaires, fondamentales pour comprendre et anticiper les systèmes de risques.

Les principes d'une logique de diffusion itérative fondée sur la présence dans l'espace d'un ou plusieurs points de basculement des systèmes de risques sont également proposés ; cette logique de diffusion peut être mise en parallèle de plusieurs observations du chapitre 1, notamment sur l'évolution structurelle des réseaux vers des structures hétérogènes et hiérarchisées et sur l'existence de « sièges » de catastrophes généralisées, dans lesquels se concentrent l'incertitude sur la trajectoire du système et une capacité de déstabilisation à l'échelle de l'ensemble du système.

Dans une logique de typologie, il est utile de croiser les différentes propriétés afin d'identifier :

- Des espaces à enjeux qui combinent un potentiel impactant cellulaire et un potentiel impactant réticulaire fort. C'est-à-dire des sous espaces qui ont à la fois une forte possibilité de changement d'état (impacté-non impacté) lors de l'impact initial du système de risques, mais aussi dont le changement d'état, s'il est avéré, serait fortement susceptible d'avoir un impact indirect sur le système de risques et sur la possibilité de changement d'état des autres sous espaces.
- Des espaces qui ne sont pas directement vulnérables à un aléa donné mais qui, par la diffusion des impacts indirects, seraient susceptibles d'être intégrés dans le système de risques.

- Les espaces qui ont de grandes chances d'être impactés mais dont l'endommagement n'a qu'un effet négligeable sur les autres espaces et sur le déroulement du système de risques.
- Des espaces dont l'endommagement direct est peu probable tout en restant plausible mais pourrait être particulièrement grave et impactant pour les autres espaces s'il venait à se réaliser.

CONCLUSION PARTIE 1

Cette partie a mis en exergue l'intérêt, voire même la nécessité, d'une approche spatiale des systèmes de risques. En prenant l'exemple des coupures électriques, nous avons montré que ces évènements ne sont pas simplement un problème réticulaire et technique, et qu'il était même indispensable d'appréhender les effets de réseaux au niveau des interdépendances réseaux-territoires pour pouvoir anticiper et plus simplement estimer les impacts et les risques associés à leurs dysfonctionnements. D'autre part, les systèmes de risques s'organisent comme des systèmes multi-niveaux dans lesquels les logiques d'imbrications spatiales, de hiérarchies et d'interdépendances verticales sont essentielles pour appréhender la diffusion rapide des impacts indirects du local vers le global et réciproquement. De plus, la forte différenciation des composantes du réseau, induit une dépendance différenciée du système vis-à-vis de ses différentes composantes, ce qui se traduit par une forme d'hypersensibilité du système, dans son ensemble, à certaines perturbations mineures mais localisées stratégiquement ; alors qu'au contraire, il peut apparaître comme extrêmement robuste à des perturbations aléatoires même d'intensité importante.

Ce constat nous conforte dans l'idée que le concept d'espaces à enjeux dans les systèmes de risques est une entrée pertinente impliquant de développer une connaissance qui ne porte pas, uniquement, sur l'interaction du système territorial avec une perturbation externe mais, primordialement, sur les interdépendances du système espace-réseau-population et les possibilités de déclenchement ou d'aggravation des systèmes de risques qu'elles induisent. La détection d'espaces à enjeux dans les systèmes de risques implique alors de développer une connaissance axée sur les interdépendances du système espace-réseau-population plutôt que sur l'interaction du système territorial avec une perturbation externe.

Pour détecter des espaces à enjeux et les effets des réseaux auxquels ils sont associés, nous avons recours à une démarche de spatialisation des systèmes de risques que nous avons appelée SCReD. L'intérêt de SCReD n'est pas dans la proposition de nouveaux concepts ou dans la redéfinition de concepts anciens, mais dans l'articulation de plusieurs concepts existants, dont la complémentarité permet de rendre compte de la complexité spatiale dans les systèmes de risques et notamment son rôle d'agent dans leurs dynamiques de diffusion. Un autre intérêt comparativement au couple classique « aléa » - « vulnérabilité » réside dans le souci d'intégrer la notion de durée et donc de donner une épaisseur temporelle variable au système de risque en fonction des sous espaces.

En termes de limites, nous avons déjà souligné que la définition de la résilience telle qu'elle est retenue peut apparaitre simpliste. D'autre part, la criticité, telle que nous l'avons défini est attaché strictement au potentiel de redynamisation spatiale, c'est-à-dire que n'est critique que ce qui aggrave non pas l'impact sociétal mais la forme spatiale du système de risque. Cette conception peut également apparaitre comme limité et entretenir une certaine confusion par rapport aux définitions plus classiques de la criticité centrée sur l'importance des impacts en termes de dommages humains. Elle est toute fois assumée et marque notre volonté d'isoler

clairement les enjeux de la dynamique spatiale des systèmes de risques des autres types d'enjeux.

La mise en œuvre de la démarche et des méthodes présentées dans cette première partie offre en perspective une quantité importante de traitements et d'analyses en partie 2. Mais devant l'intérêt théorique et opérationnel de notre problématique, l'ampleur et la difficulté de cette tâche ont constitué, depuis les premiers balbutiements de cette thèse, une sorte de moteur et de stimulant à sa conduite.

En revanche, cette mise en application impose de disposer d'un certain nombre de données dont l'obtention s'est avérée difficile et parfois même impossible. Comparativement à d'autres pays, il semble d'ailleurs que les données sur le fonctionnement et plus encore sur les dysfonctionnements du réseau électrique français, souffrent d'ailleurs d'un problème de disponibilité et de mise à disposition. Cet élément explique pourquoi le premier chapitre fait référence majoritairement à de la littérature scientifique américaine, mais aussi pourquoi, la partie appliquée de cette recherche initialement cantonnée à la région PACA, a dû s'ouvrir à l'international et être menée à partir de données et d'informations en langue espagnole (voire en Catalan) sur le cas de la coupure électrique de Barcelone.

Aussi, nous verrons que pour chacun des cas traités dans la deuxième partie, nous avons pu obtenir des données partiellement différentes, qui nous ont contraint à réadapter partiellement nos méthodes et nos objectifs à plusieurs reprises, au cours de la recherche, et en fonction de nos cas d'étude.

PARTIE 2 : APPLICATIONS RÉTROSPECTIVES ET ANTICIPATIVES DES SYSTÈMES DE RISQUES DE COUPURES ÉLECTRIQUES

CHAPITRE 4 : ANALYSES RÉTROSPECTIVES ET APPLICATIONS À LA REGION PACA ET AU DÉPARTEMENT DU VAR

Introduction

Le chapitre 1 a rappelé dans quelle mesure, derrière l'aspect brutal du déclenchement et de la diffusion du système de risques, pouvaient exister des causes profondes opérant dans une temporalité plus longue, inhérente en particulier au développement des réseaux techniques, des territoires et des sociétés. Si par nature, la coupure électrique existe depuis l'invention de l'électricité, la problématique des systèmes de risques associés aux coupures électriques tels que décrits jusqu'ici ne se pose pas dans les mêmes termes et aux mêmes échelles selon l'époque et les territoires. D'autre part, nous avons aussi souligné à quel point l'imbrication est un élément déterminant dans l'organisation des réseaux et tout particulièrement celle du réseau électrique. Ainsi, une panne électrique en région Provence-Alpes- Côte d'Azur (PACA) peut concerner exclusivement ce territoire tout comme elle peut être le résultat d'une panne à l'échelle de l'ensemble de la France, voire de l'Europe. De même, la région PACA peut être la source ou la cible des défaillances des méta-systèmes, nous retrouvons alors l'idée d'interdépendance scalaire et le fait qu'à l'échelle d'un sous-système, celui-ci est plus ou moins dépendant de ses niveaux supérieurs, tout comme ces derniers sont plus ou moins dépendants de cette composante de niveau inférieur.

Pour ces deux raisons, avant de nous focaliser plus spécifiquement sur des évènements locaux ou régionaux, nous avons souhaité débuter ce premier chapitre d'analyse dite rétrospective par une réflexion sur l'évolution du contexte électrique à l'échelle plus vaste de la France dans un premier temps, puis de l'Europe. Il ne s'agit pas d'effectuer un diagnostic technique de l'état présent du réseau, qu'un ingénieur électrique serait mieux à même de produire qu'un géographe, mais plus spécifiquement d'observer comment les articulations entre l'équilibre électrique global de l'ensemble du système et les déséquilibres locaux ont pu se réaliser à des échelles différentes selon l'évolution des capacités techniques et des choix stratégiques. Dans ce cadre, l'analyse portera une attention spécifique à la région PACA et l'organisation de son approvisionnement électrique. Contrairement à la région bretonne, autre région actuellement en situation de fragilité électrique, et ayant toujours été en situation de sous production électrique par rapport à sa consommation, la région PACA était initialement une région au profil plutôt exportateur, il sera donc intéressant de réfléchir à la manière dont a émergé cette fragilité dans l'histoire du territoire électrique français. Les bifurcations qui peuvent s'observer dans cette trajectoire participent indirectement à la systémogénèse profonde du système de risques, à la création de possibilités nouvelles de déclenchement d'effets en cascades opérant à de nouvelles échelles. Si l'on pense qu'elles n'ont pas toujours existé, comment alors cette possibilité de système de risques s'est-elle créée, est-elle homogène dans

l'espace régional et quelles stratégies de gestion sont-elles mises en œuvre par les gestionnaires ?

Enfin, une fois proposées des hypothèses sur les causes profondes de la construction de certains systèmes de risques, nous débuterons les analyses rétrospectives de type plus évènementiel. On passe alors d'une réflexion sur la création du système de risques, à une réflexion sur son déclenchement, sa diffusion et sa résorption. Dans ce chapitre, la spatialisation de ces systèmes de risques prend en compte cette dimension temporelle mais reste assez simple dans le sens où nous ne tenons pas compte explicitement des enjeux d'imprécisions spatiales et d'incertitudes décrits dans le chapitre 3.

4.1. ENTRE ÉQUILIBRE GLOBAL ET DÉSÉQUILIBRES LOCAUX : LA CONSTRUCTION DU RÉSEAU ET LE « NON-AMÉNAGEMENT » DES TERRITOIRES ÉLECTRIQUES

4.1.1. A l'échelle de l'Europe

4.1.1.1. L'exemple de la panne du 4 Novembre 2006

L'exemple de la coupure électrique européenne du 4 novembre 2006 (RTE, 2006, UCTE, 2007) nous paraît tout à fait représentatif de cette problématique d'articulation entre les niveaux d'organisation d'un système et un exemple de crise électrique de grande ampleur où un évènement local *a priori* anodin (coupure volontaire d'une ligne allemande de 400 000 volts pour permettre le passage d'un navire norvégien circulant sur la rivière Ems en Allemagne), intervenant dans un contexte assez stable (pas de fortes consommations par rapport au modèle de prévision de la demande), provoque pourtant une cascade de surcharges et de déconnexions de lignes électriques obligeant les gestionnaires à délester volontairement quinze millions de foyers répartis inégalement dans presque toute l'Europe. L'enjeu n'est absolument pas de produire une description factuelle détaillée de la coupure électrique, plusieurs retours d'expériences sont déjà disponibles sur cette question et nous ne serions bien sûr pas en mesure de produire ce type d'analyse à une telle échelle (RTE, 2006, UCTE, 2007). Dans cet exemple, l'attention ne se porte pas sur l'origine, le déclenchement, ou sur les impacts indirects de la panne.

En revanche, notre intérêt est axé spécifiquement sur le processus de dislocation du système qui a eu lieu au cours de cet évènement et qui est assez typique des pannes en cascades dans les réseaux électriques. Initialement, les conditions de fonctionnement du réseau ne présentent pas de particularité et la consommation peut être qualifiée de relativement faible pour un samedi soir. Le maintien de l'équilibre global entre l'offre et la demande ne présente donc *a priori* aucune réelle difficulté. Dans la configuration du système électrique, ce soir-là, l'équilibre global est fondé sur des déséquilibres locaux que l'on observe notamment entre les trois grandes zones (virtuelles) qui vont apparaître pendant la coupure et qui sont résumées dans la figure empruntée au retour d'expérience sur cet évènement.

La dislocation du système provoquée par les surcharges en cascades et le déclenchement des organes de protection de plusieurs composantes du réseau, est donc le passage d'un équilibre global à des déséquilibres locaux qui conduit à une augmentation de la fréquence du réseau dans la zone nord-est du réseau européen où la production est à ce moment-là excédentaire par rapport au niveau de consommation. Inversement elle conduit à la diminution de la fréquence dans la partie ouest où la consommation est nettement excédentaire par rapport à la production, enfin dans la partie sud-est, le déséquilibre est moindre et la variation de fréquence l'est donc également (figure 34).

Comme précisé, ces trois zones sont initialement « virtuelles », dans le sens où elles ne constituent pas une échelle de fonctionnement, ni dans la planification, ni la gestion du réseau, ce sont des zones qui ont été « révélées » par la coupure. Ces sous-parties du réseau, reposent elles-mêmes sur des déséquilibres internes. Par exemple, bien que la zone ouest soit globalement en situation de sous production, la production d'électricité de la France était à ce moment-là assez nettement excédentaire par rapport à la consommation et donc fortement exportatrice, à l'inverse, en Italie par exemple, les flux électriques avec les voisins transfrontaliers étaient fortement importateurs. Pour retrouver un équilibre entre l'offre et la demande et éviter l'écroulement des sous-systèmes du réseau, qui aurait sans doute eu lieu si la fréquence d'un des sous-systèmes avait dépassé une fréquence de 52 Hz ou était descendu en dessous de 49 Hz, les gestionnaires de réseaux sont alors contraints de procéder à des délestages dans chacune des trois zones.

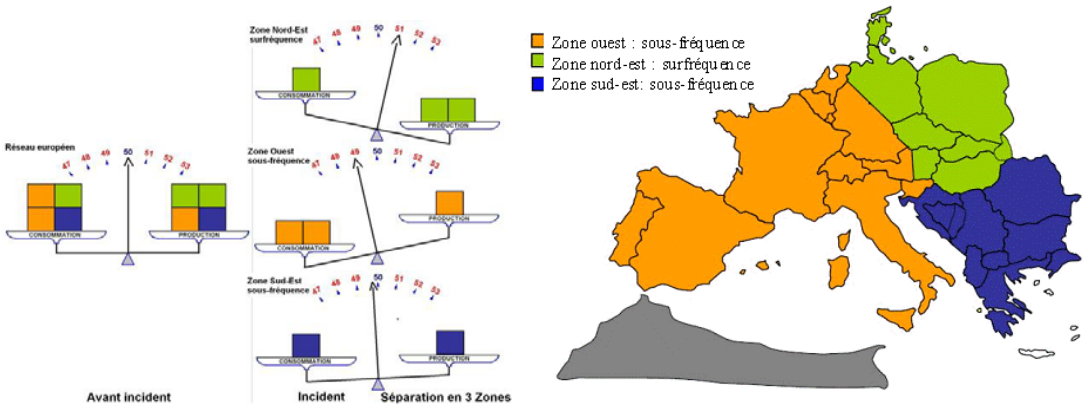


Figure 34 : Des situations de déséquilibre entre offre et demande d'électricité et l'apparition de déséquilibres de fréquence lors de la désolidarisation du réseau électrique UCTE le 4 novembre 2006. (Source : RTE, 2006).

Du fait de sa situation au cœur des échanges électriques de la zone ouest européenne et de sa situation excédentaire sur le plan de la production, c'est aussi en France que les pertes de puissances et les délestages ont été les plus importants avec plus de 5000 MW coupés, de manière répartie dans l'ensemble des régions du pays, et qu'elles impacteront directement environ 10% de la consommation totale française. La question de l'équilibre et de l'imbrication des niveaux apparaît alors assez complexe à saisir. En situation de « surproduction », la France se trouve pourtant en situation de sous-fréquence car elle bascule, du fait de la dislocation du réseau, d'une appartenance à un ensemble équilibré entre l'offre et la consommation électrique à l'échelle européenne ou plus exactement du réseau UCTE, à

une appartenance à un sous ensemble de pays du nord-ouest européen qui se trouve lui, en niveau global de « sous production ».

Pour réduire ce niveau de sous production globale et améliorer la fréquence globale du sous réseau nord-ouest, la France procède à des délestages alors qu'elle est, elle-même en situation de surproduction. Voir dans ce phénomène, une sorte de sacrifice courageux au bénéfice de nos voisins européens, comme certains gestionnaires ou journalistes français ont tenté de le présenter est toutefois un raccourci un peu rapide. En effet, si pour se protéger la France avait choisi de s'isoler du reste de l'Europe en coupant l'ensemble de ses liaisons transfrontalières, elle se serait trouvée dans une situation de forte surproduction, provoquant donc une hausse de la fréquence à des niveaux potentiellement très dangereux à l'échelle de son réseau électrique « fermé », et des coupures sans doute encore plus graves que celles observées à l'échelle de la zone nord-est au cours de la coupure électrique.

4.1.1.2. Quel modèle de territoire électrique européen ?

On connaît l'importance du syndrome NIMBY (« Not in my back yard ») touchant une partie des projets d'aménagement ou des constructions d'infrastructures. Ce phénomène est évidemment très présent dans la question des lignes électriques à très haute tension, d'autant plus que ces infrastructures sont à la fois perçues comme des nuisances visuelles et esthétiques fortes mais sont aussi associées depuis plusieurs années à de fortes suspicions de nuisances sanitaires, chez environ 60% des populations, d'après une enquête commandée par RTE et citée dans (Bouneau et al., 2007). Ce dernier souligne également que la ligne électrique qui était un symbole fort de modernité, jusqu'à être mis en avant par exemple dans l'affiche présidentielle de François Mitterrand en 1965, sous le slogan pour une France Moderne, est ensuite devenu au fil du temps, un objet dont l'esthétique doit désormais tenir à l'invisibilité. Ainsi, on imagine mal en 2012, une affiche présidentielle ou une affiche politique qui mettrait en avant un candidat sous une ligne électrique. La représentation sensorielle de l'infrastructure électrique a donc profondément changé en assez peu de temps.

Malgré cela, l'Europe électrique dont les racines remontent aux années 1950, est défendue et construite presque exclusivement dans une logique de grandes liaisons transfrontalières ; plusieurs documents mettent ainsi en avant l'urgence et le caractère prioritaire de ces liaisons pour la politique énergétique et la réalisation du Marché européen (notamment la liaison entre la France et l'Espagne). L'Union Européenne impose en effet que chaque Etat soit doté de capacités d'interconnexions au moins égales à 10% de sa capacité de production et déclare que « le Marché ne doit pas être entravé par des contraintes physiques » (UE, 2001), alors que pour plusieurs experts dont Pascal Boiteux, ancien président d'EDF, « tout ce remue-ménage a été décidé officiellement pour créer un véritable marché européen de l'électricité. Or, il faut être d'une douce innocence pour défendre un point de vue pareil. Pourquoi ? Parce qu'on ne construit plus de lignes depuis plusieurs dizaines d'années. » (Boiteux, 2003) ou encore « L'Europe électrique n'existe pas, elle n'a jamais été que la juxtaposition de systèmes électriques nationaux mal reliés entre eux. » (Soult, 2004).

Le problème de l'Europe électrique peut néanmoins se poser dans des perspectives moins radicales et plus alternatives, par exemple, au niveau de sa logique de fondation, passer d'une logique de liaison électrique transfrontalière reposant uniquement sur de grandes infrastructures de transport à une logique de développement de région électrique transfrontalière basée par exemple sur une logique de développement innovant et de valorisation commune des ressources locales paraîtrait mieux à même de faciliter l'adhésion des populations locales tout en étant plus adaptée aux stratégies de développement durable et aux objectifs environnementaux que s'est fixée l'Union Européenne et donc l'ensemble des pays membres. Elle consisterait alors à faire des régions transfrontalières européennes des moteurs de développement d'une Europe électrique durable, plutôt que de concevoir ces régions comme de simples contraintes à faire céder pour pouvoir mettre en place un grand marché électrique européen.

4.1.2 A l'échelle de la France, l'évolution et la réorganisation du territoire électrique entre 1960 et 2005

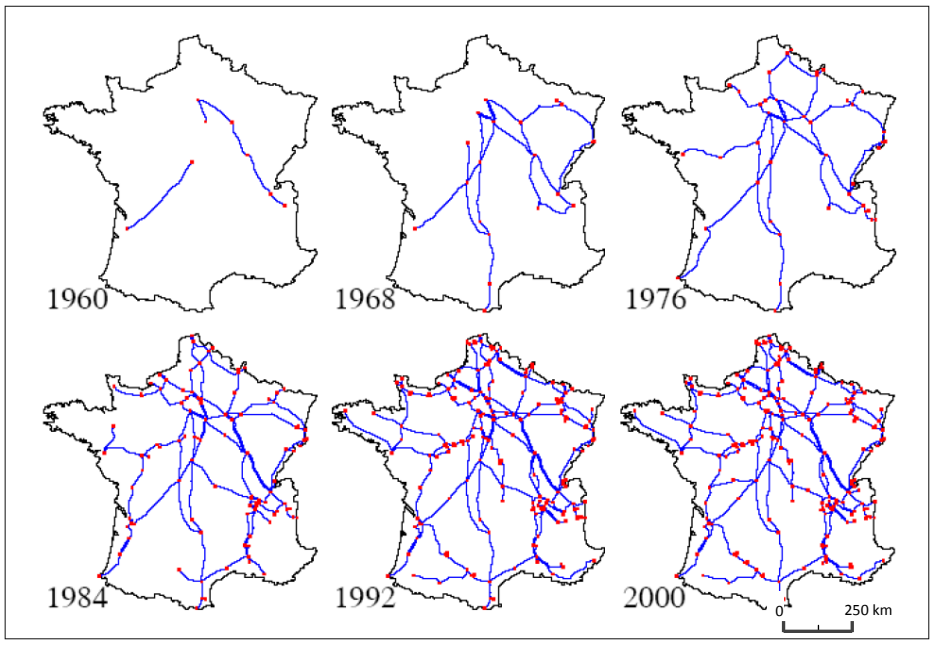
Nous avons évoqué dans le chapitre 1 des éléments sur la diffusion spatiale de l'innovation électrique et sur la croissance du réseau électrique en France ; dans le processus d'électrification du territoire français, les réseaux locaux et régionaux préexistaient au réseau national et ce n'est que dans un second temps, à partir de 1938, que s'est réalisée la synchronisation des huit systèmes régionaux et la mise en œuvre des interconnexions à un niveau national s'appuyant sur le réseau 220 000 Volts. Aux prémices d'un système national, chaque sous-système disposait donc, de manière autonome de capacités de production relativement proches des pics de consommation de sorte que même s'ils étaient en interactions puisqu'interconnectés, le niveau d'interdépendance entre les sous-systèmes était relativement faible ou du moins, ces systèmes disposaient d'une certaine autonomie. On peut donc considérer que l'équilibre entre offre et demande à l'échelle du système global repose initialement sur l'imbrication d'équilibres locaux ou du moins régionaux.

A ce moment de l'Histoire et en l'état des techniques connues, concevoir le système électrique à l'échelle nationale permettait d'en augmenter la rentabilité commerciale et la fiabilité en rendant possible des mécanismes de complémentarités et de solidarités interrégionales. Ces solidarités étaient établies en particulier entre le sud de la France, riche en ressources hydrauliques mais n'absorbant qu'une partie de cette consommation, et le nord du pays, riche en ressources thermiques. Ainsi peut-on lire dans les ouvrages géographiques de l'époque : « la France se trouve partagée en deux secteurs à peu près égaux par une ligne tracée de Bordeaux à Strasbourg : au sud de cette ligne, se trouve la grande majorité des chutes ; au nord, se trouvent réalisées les conditions d'installations d'usines thermiques : bassins houillers, ports d'importation du charbon, grosse métallurgie. Or, les régions qu'alimentent les usines hydrauliques n'absorbent en moyenne que 70% de leur production, et l'aménagement des chutes s'effectue à une cadence plus rapide que le développement de la consommation, d'où la nécessité d'exporter l'excédent d'énergie. De telles exportations sont d'ailleurs conformes à la politique d'interconnexion des centrales de production. » (Clozier, 1934). L'équilibre global des systèmes électriques fut donc assez tôt construit dans une

logique de compensation entre des déséquilibres à l'échelle du pays permettant de maintenir un état de stabilité et d'optimiser son efficacité économique.

Pour poursuivre l'exemple français, l'organisation du système électrique est également liée aux progrès techniques qui permirent d'augmenter les niveaux de puissance des lignes de transport électrique avec la mise en service de lignes à 400 000 volts, et assurèrent aux gestionnaires une capacité de transport des électrons plus importante et sur des distances plus lointaines, ou encore au développement du nucléaire civil, qui a contribué à la mise en place d'une organisation centralisée de la production d'énergie, avec une mise à distance croissante entre des sites de production et leurs bassins de consommation, pour des mesures de sécurité. Les équilibres locaux ne sont dès lors plus considérés comme un enjeu puisque les capacités d'interconnexion permettent de maintenir un équilibre global. Dans le tome de l'Atlas de France consacré au Transport et à l'Energie, Roger Brunet qualifiait d'ailleurs « d'anti-aménagement du territoire » (Brunet, 1990) la réorganisation spatiale du secteur énergétique en œuvre depuis les années 1970.

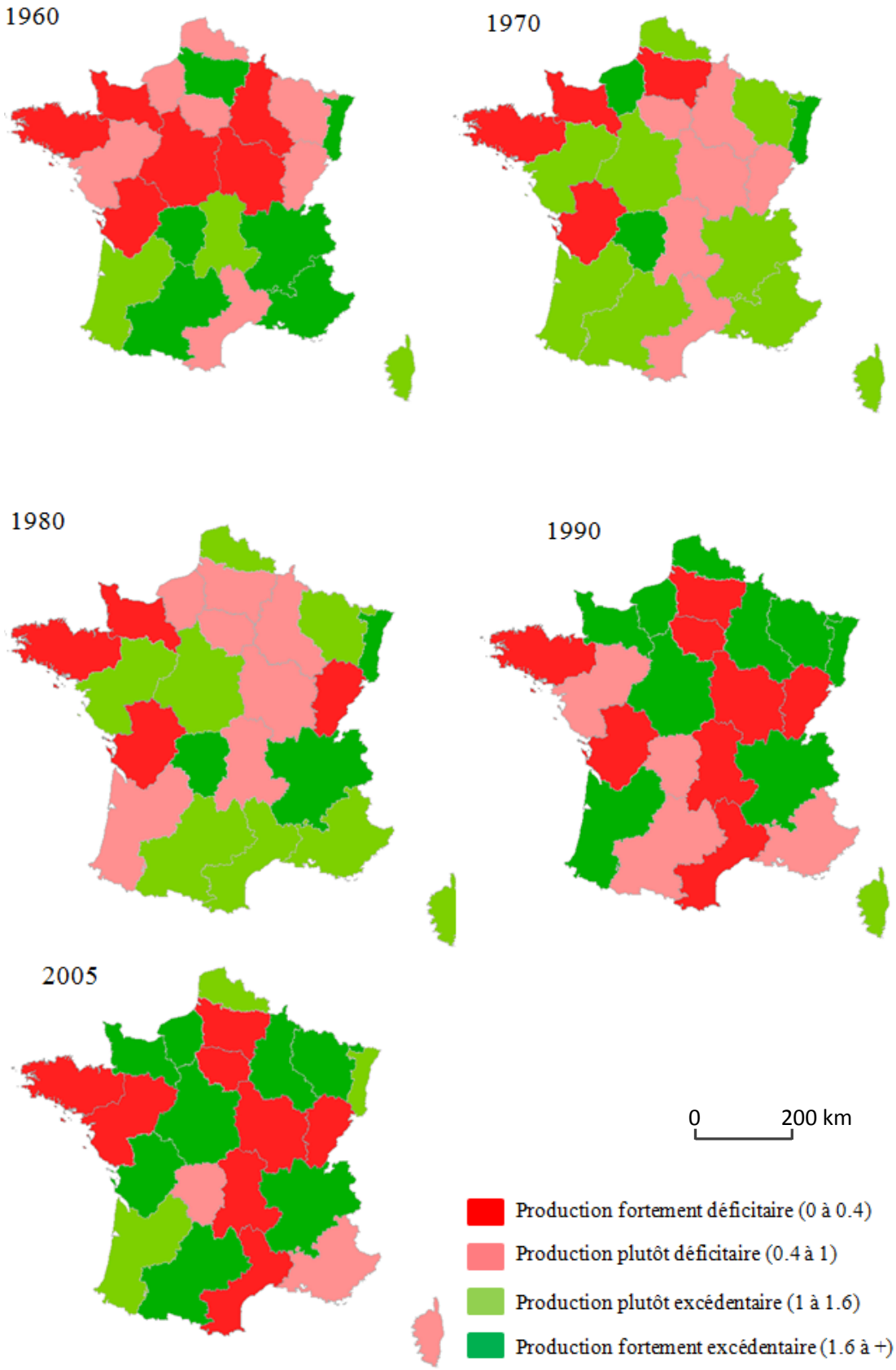
En analysant l'évolution des propriétés topologiques du réseau de transport électrique 400 kV français entre 1960 et 2000, représentée en carte 3, (Buzna, al., 2009) ont montré que ce dernier ne répondait aux propriétés des réseaux scale free pour aucune des périodes analysées et se caractérisait par un réseau organisé à partir de nœuds qui possèdent en moyenne 2.8 nœuds connexes sur l'ensemble de la période. La propriété dite des « petits mondes » s'observe par contre plus nettement ; à partir du début des années 1980, la longueur moyenne des chemins optimaux entre les nœuds du réseau devient beaucoup plus faible que celle d'un réseau aléatoire. D'autre part, l'analyse nous informe des rythmes très distincts dans la construction du réseau avec une première phase de développement plutôt lente et linéaire entre 1960 et 1975, puis à partir de 1978, une accélération très nette du taux de croissance jusqu'à arriver à une certaine saturation à partir des années 1990, où le taux de croissance de nouvelles lignes diminue très brutalement.



Carte 3 : La topologie du réseau 400kV et son évolution entre 1960 et 2000 (Buzna, 2009, données RTE)

Cette évolution de la structure du réseau s'accompagne d'une réogarnisation du territoire, d'un changement de la stratégie de production électrique, en adoptant la technologie du nucléaire (Chinon, première centrale française conçue pour la production électrique est mise en service à partir de 1963) et d'une forte hausse de la consommation électrique. Si l'on s'intéresse à l'évolution des rapports entre production et consommation électrique à l'échelle des régions dans la même période (carte 4), l'on peut observer des transformations importantes dans l'organisation de ces territoires. En 1960, cette organisation est encore fortement marquée par la disparité nord-sud soulignée dès les années 30: les régions du Sud ont tendance à produire davantage qu'elles ne consomment et inversemment pour les régions du Nord. Les exceptions picardes et alsaciennes peuvent s'expliquer en partie du fait de la proximité de la région Ile-de-France pour le premier cas, et du contexte transfrontalier et historique particulier de la seconde. La région PACA, fortement dotée en installations hydrauliques produit à cette époque nettement plus d'énergie qu'elle n'en consomme, le rapport entre la production et la consommation donne un résultat de 1,7.

Seules, les régions Rhône-Alpes et Alsace ont conservé un profil excédentaire en termes de production électrique sur l'ensemble de la période 1960 - 2005. Les régions dont le bilan est resté exclusivement déficitaire sont légèrement plus nombreuses, on peut citer en particulier la région Ile-de-France, la Bourgogne ou la Franche-Comté. Ces régions sont relativement bien raccordées au réseau 400kV, ce qui explique que ce déficit chronique ne se traduit pas par des difficultés particulières pour le maintien de l'approvisionnement électrique. En revanche, le cas de la Bretagne, qui elle aussi a toujours été partiellement tributaire de l'électricité produite dans d'autres territoires, pose d'avantage de difficultés d'approvisionnement dans la mesure où la région est faiblement connectée au réseau 400kV, avec notamment une absence de bouclage du réseau.



Cartes 4 : Evolution du rapport entre production et consommation électrique à l'échelle des régions françaises entre 1960 et 2005. (Données : RTE)

4.2. SYSTÉMOGÉNÈSE ET ORGANISATION SPATIALE DU RISQUE ÉLECTRIQUE EN REGION PACA

4.2.1 Une bifurcation dans le rapport entre la production et la consommation électrique dans les années 1980

Autre région plus faiblement connectée au réseau 400kV, la région PACA connaît une trajectoire plus complexe, puisqu'entre 1960 et 1980, elle possède un profil plutôt excendentaire qui va bifurquer à partir de 1980. Le solde devient alors de plus en plus déficitaire et passe de 1.1 en 1980 à moins de 0.5 en 1990, puis à 0.4 en 2005. Même si ce raisonnement s'affranchit un peu de la répartition réelle des flux électriques sur le réseau, on peut considérer que la production hydroélectrique, qui constitue l'essentiel de la production régionale de PACA, a pu absorber la croissance de la demande jusqu'au début des années 1980. Puis, à partir des années 1980, en même temps qu'a commencé à se développer le réseau 400kV dans la région, la production électrique a connu une diminution importante (avec la fermeture de plusieurs vieilles centrales thermiques) alors que la consommation continuait à augmenter très rapidement.

En distinguant la production et la consommation à l'échelle de la région PACA (figure 35), on observe nettement cette bifurcation qui tend à s'accentuer à partir du début des années 1980 jusque dans les années 1990, puis à se stabiliser à la baisse avec une production électrique couvrant aux alentours de la moitié de la consommation régionale. Il est important de préciser que du fait de la composition essentiellement hydroélectrique du parc de la région, la production connaît aussi des variations annuelles assez importantes, liées par exemple aux problèmes de sécheresse dans ses territoires.

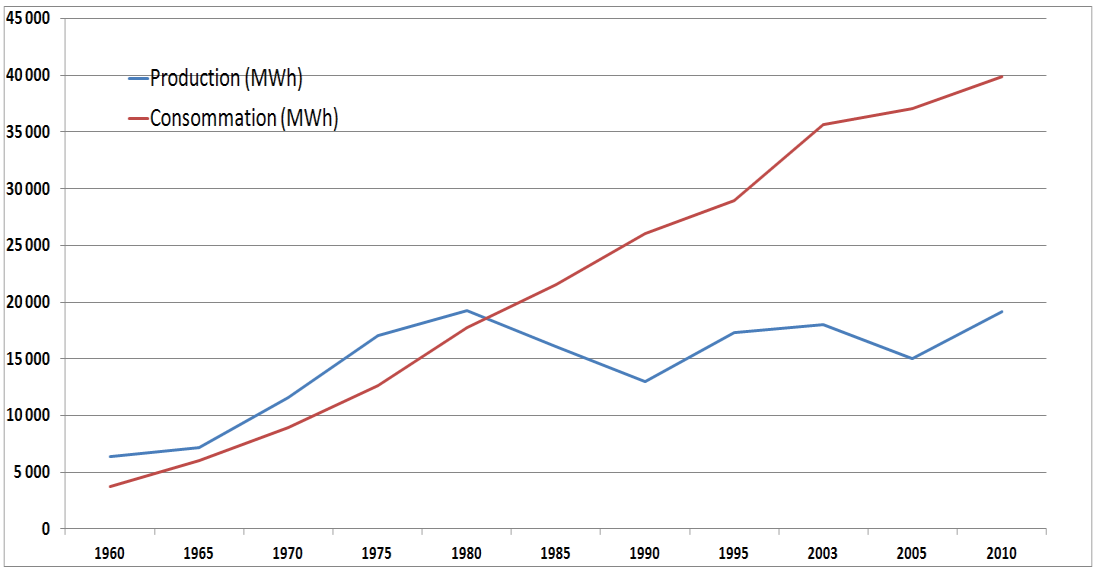


Figure 35 : Evolution de la production et de la consommation électriques à l'échelle de la région PACA entre 1960 et 2010 (Données, RTE).

Le développement des réseaux électriques a essentiellement reposé sur un processus de mise à distance de plus en plus important entre consommation et production, et peut se voir comme une réorganisation des rapports d'interdépendance entre les territoires ; le passage d'un équilibre global construit sur des équilibres locaux, vers une équilibre global construit sur la compensation entre des déséquilibres de plus en plus marqués, s'organisant à des échelles et selon des logiques différentes. Dans un premier temps, la ressource hydraulique a constitué une part essentielle de la production électrique du système français, la répartition des chutes d'eaux sur le territoire est un facteur explicatif de la dichotomie nord-sud dans les équilibres régionaux production / consommation. Dans un second temps, avec le déploiement des centrales nucléaires et des lignes 400kV auxquelles sont d'ailleurs raccordées toutes les centrales, la distinction entre un sud hydraulique et un nord thermique devient moins essentielle, de nouvelles contraintes et de nouvelles échelles d'organisations apparaissent. On peut aussi se demander s'il n'existe pas une sorte « d'effet transfrontalier » lié à la volonté de créer un marché électrique à l'échelle européenne, on remarque en effet que les régions fortement excédentaires en termes de production ont tendance à concerner des régions frontalières et bien connectées à leurs voisins par des lignes très haute tension.

D'autre part, en 2007, dans un rapport d'information sur la sécurité d'approvisionnement électrique de la France et les moyens de la préserver, plusieurs sénateurs soulignaient les disparités importantes dans les équilibres régionaux de l'électricité en France, considérant « opportun de lancer une réflexion sur la mise en œuvre d'une obligation d'équilibrage entre production et consommation qui pourrait être définie sur la base de grandes régions électriques » (Sénat, 2007). Assez logiquement, on comprend que la désolidarisation des systèmes électriques telle qu'on peut l'observer dans les coupures électriques importantes, est davantage susceptible de produire des déséquilibres à petite échelle si l'équilibre global est fondé sur un mécanisme de compensation des déséquilibres locaux plutôt que sur l'imbrication d'équilibres locaux. En parallèle, cette dernière stratégie pourrait également induire des externalités négatives parmi lesquelles une limitation des économies d'échelles et des rendements croissants avec la taille des unités de production, une limite des mécanismes de solidarité entre les sous-réseaux qui impose donc à chaque sous-système de pouvoir assumer « seul » son pic de consommation. Ainsi, sur un plan purement théorique, un équilibre global fondé sur des équilibres locaux peut également induire une augmentation de la capacité totale de production, ce qui peut rendre ce modèle économiquement moins rentable et même écologiquement plus dommageable selon le type de production électrique utilisé.

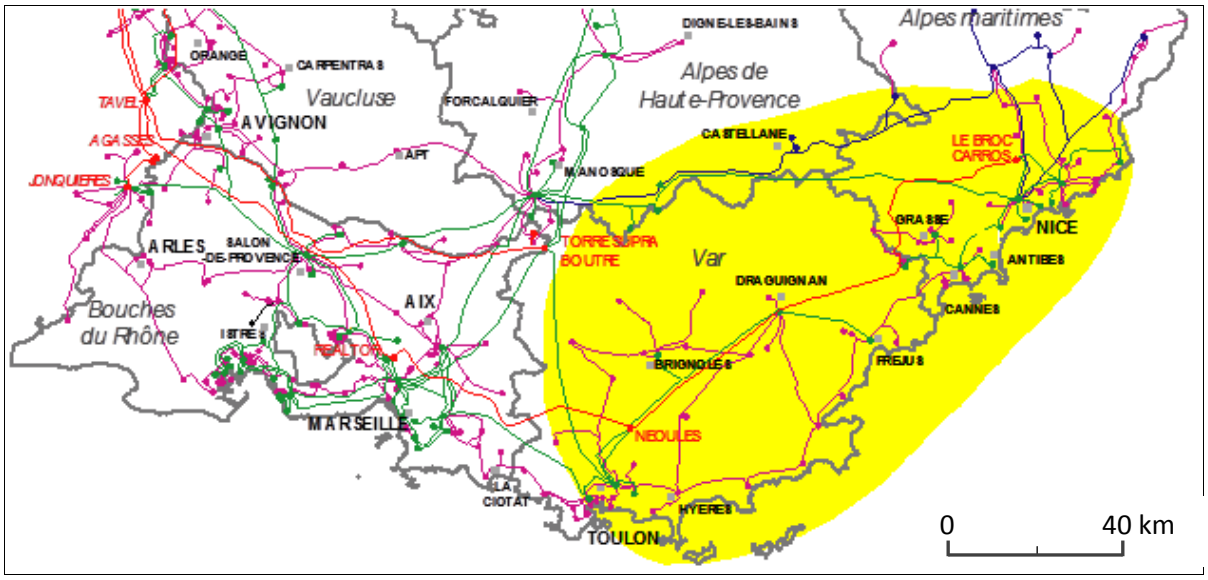
L'analyse précédente a révélé que la fragilité électrique de la région PACA n'était pas une situation de départ et qu'elle avait émergé à partir des années 1980. Cette fragilité tient à deux éléments :

- La capacité de production électrique est insuffisante et n'excède pas 50% de la consommation, ce qui implique une dépendance forte au réseau de transport pour importer de l'électricité produite hors région.
- La connexion au réseau de transport 400kV est également insuffisante, puisque la région PACA, comme la région Bretagne, ne bénéficie pas jusqu'à aujourd'hui d'un bouclage du réseau, l'absence de liaison entre Boutre et Carros engendre un non-

respect du critère de sécurité dit N-1 (c'est-à-dire la capacité à pouvoir fonctionner en cas de perte d'une ligne). De plus, le poste de Tavel, en bordure Est du Gard, constitue l'unique point d'entrée du réseau 400kV dans la région PACA.

4.2.2 Un territoire au profil fortement hétérogène

La répartition des moyens de production à l'intérieur de la région est également très hétérogène, ainsi, à l'échelle de la partie Est de la région, la production électrique ne dépasse pas 10% de la consommation électrique. Il y a donc une dépendance forte au réseau de transport électrique dans cette partie de la région ; or c'est justement dans cette zone Est, que la configuration non bouclée du réseau de transport induit une fragilité particulière (carte 5). Cette fragilité et les rebondissements autour du projet de création de la ligne 400kV Boutre-Carros sont de notoriété publique et constituent une préoccupation importante pour les gestionnaires électriques et la gouvernance territoriale au cours de ces dernières années. Elles aboutissent d'ailleurs en 2011, à la mise en place d'un Grenelle interdépartemental de la sécurisation électrique pour la zone est de PACA.



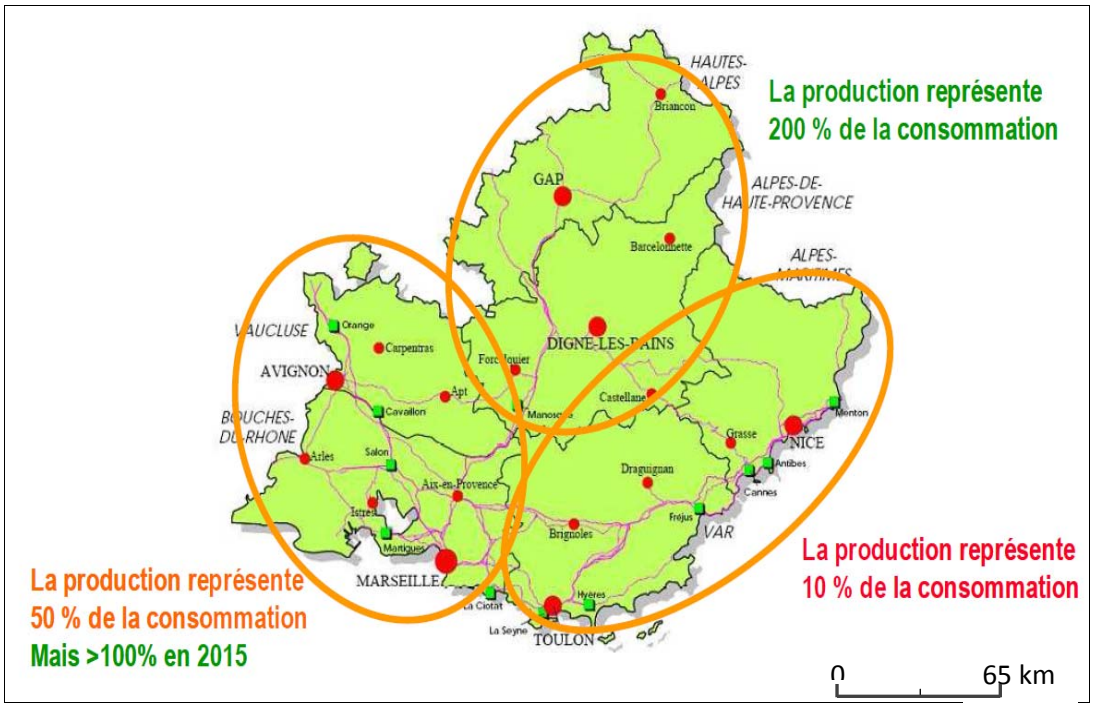
Carte 5 : Configuration du réseau et zone de fragilité PACA EST de criticité 4 (source RTE, 2006)

Le système électrique est un réseau multi-niveau, reposant sur l'imbrication de lignes de niveaux de tension variables en fonction de la distance sur laquelle l'énergie est transportée (augmentation de la tension du courant pour limiter l'effet Joule engendrant une perte d'énergie tout au long du transport). Du fait de cette imbrication des réseaux, les territoires de fragilité sont eux-mêmes imbriqués, ainsi la région PACA dans son ensemble est une zone fragile en termes d'alimentation électrique ; dans cet ensemble fragile, la zone est de PACA est un sous-ensemble encore plus vulnérable ; à l'intérieur de ce sous-ensemble, de nouveaux sous-ensembles vulnérables peuvent exister. La détection de ces zones s'appuie sur un facteur de criticité, qui renvoie à « la profondeur (en MW) de la coupure potentielle associée à la contrainte » (RTE, 2006) ; par exemple, la criticité de niveau 1 renvoie à une coupure de 0 à 50 MW, de 50 à 200 MW pour la criticité de niveau 2, de 200 à 1000 MW pour la criticité de

niveau 3 et de niveau 4 pour les coupures supérieures à 1000MW. La criticité associée à la zone PACA Est correspond à ce niveau 4. Cette hétérogénéité des moyens de production et de transport électrique à l'échelle de la région se double de l'hétérogénéité des profils de consommation et de leurs évolutions. Ainsi, on peut souligner une double fracture à l'échelle de la région, la première, entre les départements littoraux qui représentent plus de 80% de la consommation électrique régionale, et les départements intérieurs (carte 6). La seconde, à l'échelle des départements littoraux est tout aussi marquée et oppose d'un côté les départements du Var et des Alpes Maritimes (PACA-est), dont le profil de consommation électrique est très orienté vers les activités résidentielles et tertiaires, alors que le département des Bouches-du-Rhône possède une consommation plus forte et primordialement industrielle.

Cette distinction implique plusieurs éléments :

- En termes d'effet de la coupure, les pertes aux activités économiques sont *a priori* plus importantes à l'ouest.
- En termes de croissance, la consommation résidentielle augmente de manière plus rapide que la consommation industrielle, ce qui conduit, pour un état statique des moyens de production et de transport, à une aggravation du risque dans la zone Est de PACA.
- En termes de compatibilité des activités dans l'espace, on peut penser que la production électrique est par nature une activité de type industriel, aussi dans des territoires tournés vers une économie résidentielle comme peuvent l'être le Var ou les Alpes-Maritimes, il est peut-être plus difficile de mettre en œuvre et faire accepter la construction d'infrastructures liées à la production électrique.



Carte 6 : L'hétérogénéité des rapports production – consommation à l'échelle de la région PACA. (Source : RTE, 2006)

Du fait de cette fragilité, la partie est de la région PACA a connu plusieurs pannes électriques importantes dans la décennie 2000-2010. Ces pannes sont généralement liées à des délestages,

c'est-à-dire, que le gestionnaire du réseau coupe volontairement une partie de l'énergie pour éviter l'écroulement du réseau. Contrairement à un écroulement du réseau, lors de ces délestages, le gestionnaire garde un certain contrôle et dispose de possibilités pour maintenir l'énergie à une partie de la population dont on a identifié au préalable qu'elle était fortement dépendante à l'électricité ; on parle alors de clients prioritaires, ces derniers sont intégrés dans ce qu'on appelle des plans de délestages.

En période de pic de consommation, la sécurité d'approvisionnement électrique est évidemment plus difficile à maintenir qu'en période de faible consommation ; ainsi on apprend dans le volet régional PACA du Schéma de Développement du Réseau Public de Transport d'Electricité que : « pendant 1500 heures en 2005, la demande Est PACA dépasse le niveau au-delà duquel la sécurité d'alimentation de la zone n'est plus assurée en cas de perte fortuite d'une ligne (risque « N-1 »). Une telle situation est sans équivalent en France. *A fortiori*, la perte simultanée de deux lignes (risque « N-2 ») conduit au délestage de manière quasiment inéluctable en cas de perte de la ligne double Néoules-Broc Carros et une fois sur deux en cas de perte de la ligne double Réaltor - Néoules. Or, ce risque « N-2 » est avéré en raison de la fréquence des incendies : des délestages pour cette raison ont eu lieu à trois reprises dans entre 2001 et 2005 (6 juillet 2001, 29 et 30 juillet 2003)» (RTE, 2006). Cette dernière remarque sur les incendies nous rappelle que le risque de coupure électrique s'intègre dans un système de risques ; ainsi pour mieux comprendre comment s'effectue cette articulation entre le risque d'incendie et le risque électrique en région PACA, nous reviendrons dans la partie suivante sur les coupures électriques du 6 mai 2005 et de juillet 2003.

4.3. LES INTERACTIONS ENTRE INCENDIES ET COUPURES ÉLECTRIQUES EN REGION PACA

4.3.1. Le cas de l'incendie du 6 mai 2005

La coupure électrique qui a affecté la région Provence-Alpes Côte d'Azur (PACA), en mai 2005 illustre tout à fait cette notion de système de risques. Le point de départ de la séquence d'évènements serait, *a priori*, un simple abattage d'arbre vers 17 heures dans la commune de Velaux (Bouches du Rhône) ; à cause d'un vent important sur la zone, l'abattage de l'arbre est mal maîtrisé puisqu'il tombe sur une ligne BT (basse tension) qui finit par céder, ce qui serait à l'origine du départ d'incendie (SDIS 13, 2006). Cette première succession d'évènements fait naître un niveau de risque incendie important du fait de vents forts (entre 80 et 100 km/h) et de la proximité d'un massif forestier de 1000 hectares. Pour limiter la propagation du feu, le CODIS mobilise alors des renforts humains des départements du Gard, du Var et du Vaucluse ainsi que plusieurs avions bombardiers d'eau. Vers 17h30, le CODIS demande à RTE la mise hors tension de deux lignes 63 kV (Rognac - Duranne et Rognac - Vitrolles), afin de permettre des interventions aériennes sûres et efficaces ; puis vers 19h, la mise hors tension des deux lignes 400 kV (Tavel - Réaltor), qui seront coupées après autorisation du Préfet des Bouches du Rhône aux alentours de 20h30 pour la première, et 20h50 pour la seconde. Ce délestage volontaire facilite alors les interventions aériennes qui permettent de maîtriser l'incendie autour de 21h, avec environ 250 hectares de surfaces

impactées, ce qui est relativement peu quand on sait que l'été précédent, un incendie dont le point de départ se situait également à Velaux, avait détruit près de 2 900 hectares.

Parallèlement, du fait de la fragilité électrique de la région, tant du point de vue de ses moyens de production (la capacité de production régionale est mal répartie et n'excède pas 40% de la consommation), que de sa connexion au réseau de transport (critère de sécurité N-1 non respecté ; c'est-à-dire qu'en cas de perte d'un ouvrage 400 kV, le gestionnaire ne peut assurer le maintien d'alimentation), de l'incapacité de pouvoir faire appel à de l'énergie importée en quantité suffisante (l'interconnexion région PACA- Italie repose sur une simple ligne 225 kV) la mise hors tension des lignes 400 kV Tavel- Réaltor nécessite le délestage de 1200 MW, provoquant la coupure d'alimentation d'environ 1 million de foyers, répartis de manière éparse dans presque toute la région, avec des juxtapositions entre les îlots alimentés et ceux délestés. Vers 21h, lorsque l'incendie est circonscrit, le CODIS autorise la remise sous tension des lignes 400 kV, mais la relance d'un système électrique après une coupure d'une telle ampleur nécessite un certain temps de réponse, tant et si bien que certaines zones ne seront pas réalimentées avant 2 h du matin.

Cette coupure étant volontaire, le gestionnaire du réseau conserve une maîtrise sur le système, ce qui a permis notamment, de préserver l'alimentation des clients prioritaires (les hôpitaux par exemple). Néanmoins et malgré cette précaution, l'absence d'électricité a multiplié les situations à risques : personnes coincées dans les ascenseurs, aucun éclairage public, dysfonctionnement des feux de circulation, saturation des standards d'appels des services de secours ou encore fermeture de tunnels urbains. Dans ce système de risques, l'aléa déclencheur : l'incendie, menace par effet direct une surface d'environ 1000 ha et se propage entre 17h et 21h, par contre, en tenant compte des effets indirects, cette couverture spatiale s'étend, et plonge dans une situation de crise une surface de plusieurs centaines de kilomètres carrés, pendant une période débutant à 21h et finissant en moyenne à 24h. Indirectement, c'est l'incendie, et même la simple chute d'un arbre, qui va faire qu'une personne reste bloquée dans un ascenseur situé à plus de 200 kilomètres de l'aléa initial.

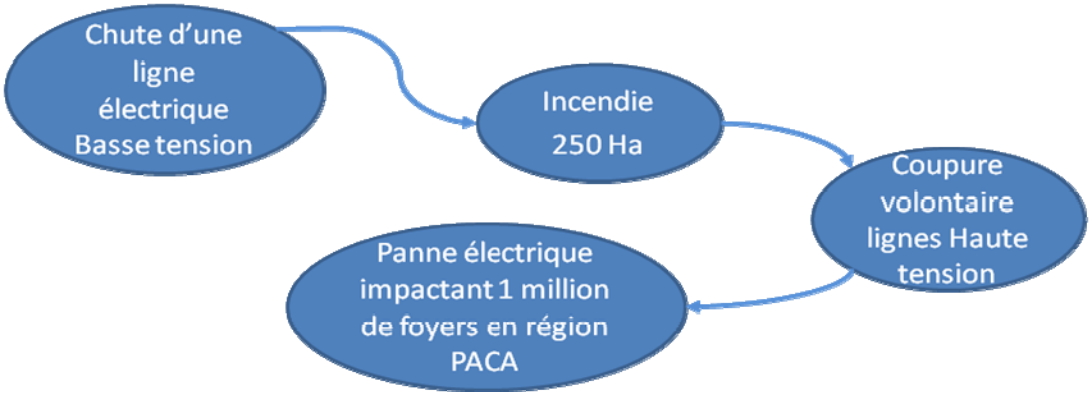
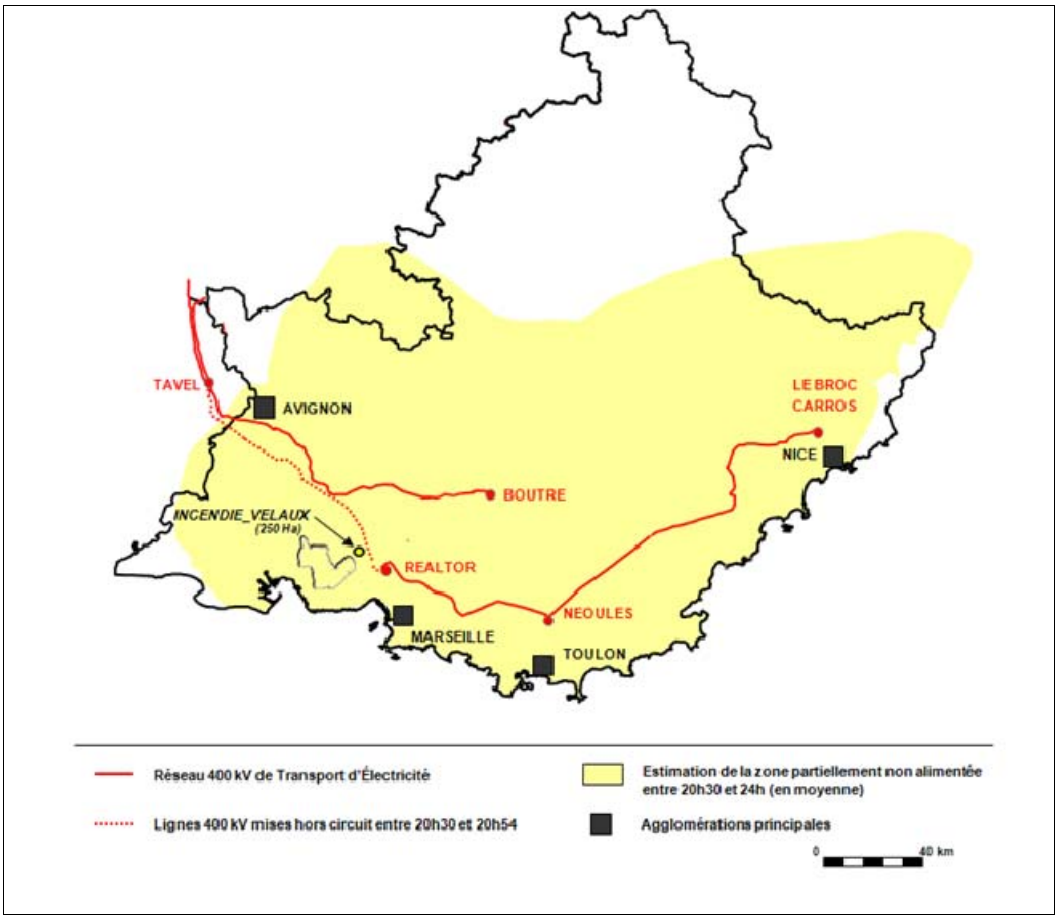


Figure 36 : Cascade d'évènements conduisant à partir de la chute d'une ligne basse tension à la coupure électrique d'un million de foyers en région PACA.



Carte 7 : Localisation de l'incendie, de la ligne électrique haute tension Tavel Réaltor coupée et estimation imprécise de la zone impactée par la coupure.

L'interaction entre aléa incendie et aléa électrique est un enjeu particulièrement important en région PACA, ainsi dans son bilan de sûreté 2005 (RTE, 2006), le gestionnaire du réseau de transport électrique déclare que pour l'année 2005, 22 journées d'incendie ont menacé des lignes électriques, se soldant à 3 reprises par des délestages. Inversement, comme nous l'avons vu, l'aléa électrique peut être déclencheur de l'aléa incendie, même si la fréquence de cet effet domino demeure difficile à chiffrer puisque les causes d'un incendie ne sont pas toujours identifiables. Les estimations sur la part d'incendies de forêts causés par des problèmes de lignes électriques varient d'ailleurs très fortement. Certaines associations de protection de l'environnement parlent dans la presse de 40% des cas de feux de forêts causés par les lignes électriques haute tension (R. Ferrato, Var Matin, 2005), les analyses de la Base Prométhée réalisées par l'Observatoire de la Forêt Méditerranéenne (OFME, 2003), donnent des résultats nettement inférieurs, dans 9% des cas observés entre 1973 et 2003, les incendies sont directement liés aux lignes électriques (contact branche-ligne) ; à ce pourcentage il faut rajouter les accidents électriques, rangés dans la catégorie accidents, qui représentent 13% des cas.

Le cas du 6 mai 2005 soulève plusieurs remarques. Il est d'abord intéressant de noter l'existence d'une boucle de rétroaction positive entre les aléas, dans la mesure où un problème léger dans le système électrique (chute d'une ligne basse tension) provoque un incendie qui en retour provoque un aléa électrique de plus grande ampleur (reposant sur la mise hors tension volontaire d'une ligne haute tension). D'autre part, si les aléas se combinent, il en est de

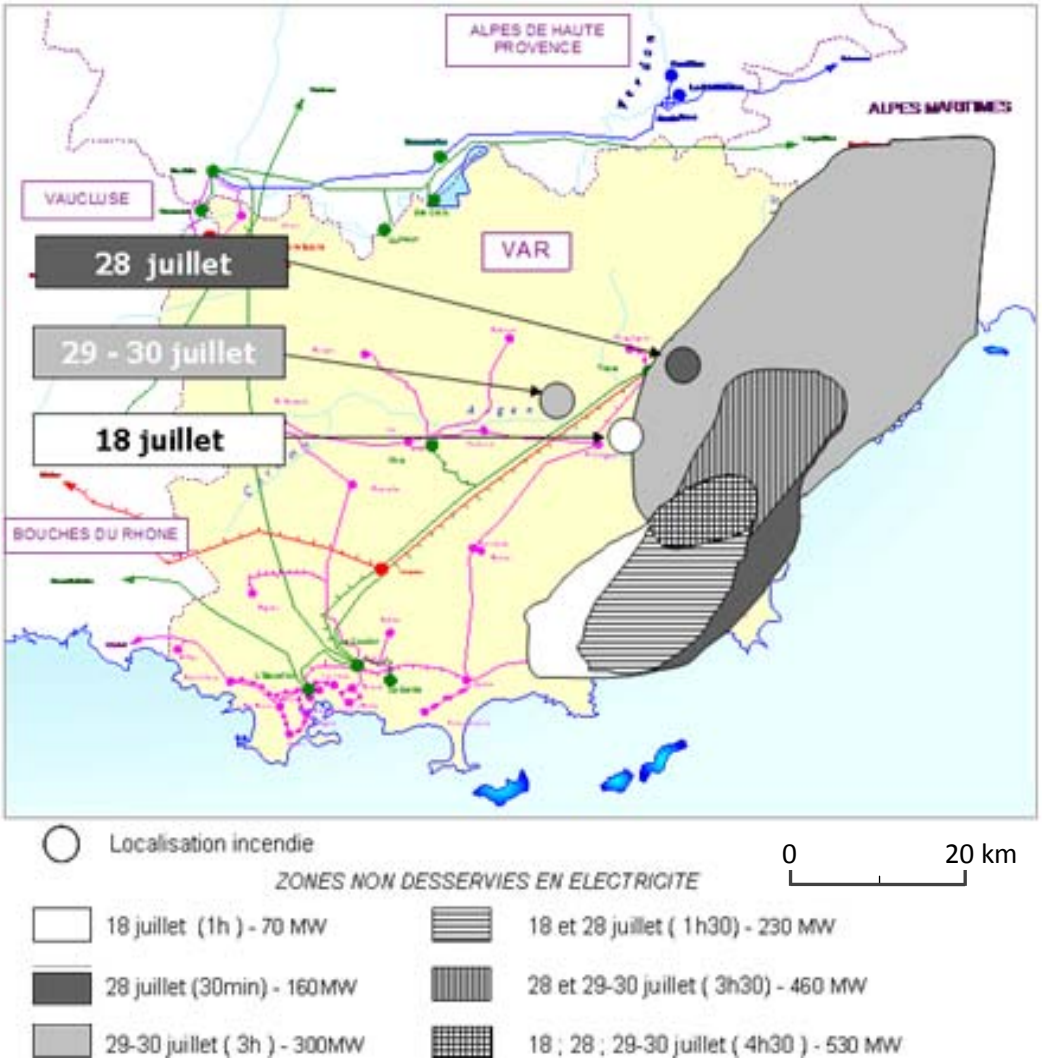
même des vulnérabilités, puisque, si cet évènement a pu se réaliser, c'est avant tout parce que la région PACA cumule une forte fragilité en termes d'alimentation électrique avec une forêt méditerranéenne fortement vulnérable aux incendies. Enfin, les deux aléas de cet exemple sont situés en région PACA mais il est tout à fait envisageable qu'un aléa situé hors de ses limites affecte indirectement l'alimentation électrique de la région dans son ensemble, tout comme il est possible qu'un aléa situé dans la région possède un impact électrique qui, par effet de cascade et dans certains contextes de consommation, déborde les frontières régionales et nationales (un aléa local qui se transformerait en crise globale).

Un effet indirect de la panne électrique que nous avons volontairement peu abordé concerne la relance du débat sur la ligne 400kV Boutre-Carros ; au-delà des enjeux économiques, environnementaux et énergétiques que cette infrastructure soulève, on peut préciser que d'après des simulations dans un contexte de consommation identique, la présence d'une ligne 400kV entre Boutre et Carros aurait permis de minimiser l'ampleur du délestage sans pour autant l'éviter totalement (le niveau de criticité diminue mais n'est pas annulé). D'autre part, d'après les études prévisionnelles de RTE, sur un spectre de scénarios plausibles d'évolution de la demande de consommation en région PACA, les risques qui pèsent sur la région en termes d'alimentation électrique, même dans le cas d'une création de la ligne 400kV Boutre-Carros, réapparaîtraient entre 2015 et 2020.

Si l'on s'intéresse à l'importance de la localisation de l'aléa de départ, on se rend compte qu'une légère variation aurait pu engendrer des impacts indirects très différents ; la coïncidence spatiale entre aléa et composantes à enjeux du réseau électrique est ici un élément essentiel pour expliquer l'ampleur de cette crise. En intégrant des effets dominos, la sensibilité à de légères fluctuations devient plus importante, ce qui n'est pas sans poser de problèmes en termes de prévisions. Ainsi, il aurait suffi que l'incendie soit à proximité de la ligne Realtor-Néoules plutôt que de la ligne Tavel-Realtor, ce qui correspond à un décalage dans la direction sud-est de l'ordre de 20 kilomètres de l'aléa de départ, pour que les impacts de la mise hors tension ne concernent plus que la zone Est de PACA.

4.3.2. Les cas d'incendies de Juillet 2003

Dans la présentation régionale du Schéma de Développement du Réseau Public de Transport Electrique (RTE, 2005), le gestionnaire du réseau de transport procède à une analyse qui va tout à fait dans ce sens, à travers l'exemple des incendies de la région des Maures et des coupures électriques qui en ont découlé lors de 3 incendies en Juillet 2003. La carte 8 montre bien que de légères variations dans la localisation de l'aléa initial peuvent engendrer des variations importantes dans la diffusion des impacts indirects.



Carte 8 : Variabilité des impacts électriques (en termes d'espace – durée - puissance délestée) en fonction de la localisation des incendies du Massif des Maures durant l'été 2003 (D'après RTE, 2005)

On en déduit que le développement réticulaire des territoires et les interdépendances qu'il fait naître, fait émerger des risques plus complexes, tant au niveau des combinaisons d'évènements possibles que des formes spatiales que ces combinaisons engendrent. L'anticipation de ces systèmes de risques devient particulièrement difficile dans la mesure où de légères variations spatiales de l'aléa initial sont susceptibles de provoquer des systèmes de risques aux trajectoires très différentes. Pour les systèmes de risques de coupure électrique en région PACA, ces espaces forestiers varois sont donc à la fois susceptibles dans la mesure où les installations électriques sont soumises à des perturbations externes (incendie ou simplement un contact entre une ligne et un arbre) mais également critiques dans la mesure où l'endommagement de ces installations électriques peut dans certains contextes provoquer une diffusion spatiale importante des impacts indirects.

D'autre part, le fait que certains espaces soient impactés quelles que soient les variations de la localisation de l'aléa de départ, est un signe d'une vulnérabilité accrue, que l'on peut anticiper, à condition de combiner l'analyse du risque d'incendie avec la simulation du comportement du système électrique soumis à des perturbations d'intensité et de localisation

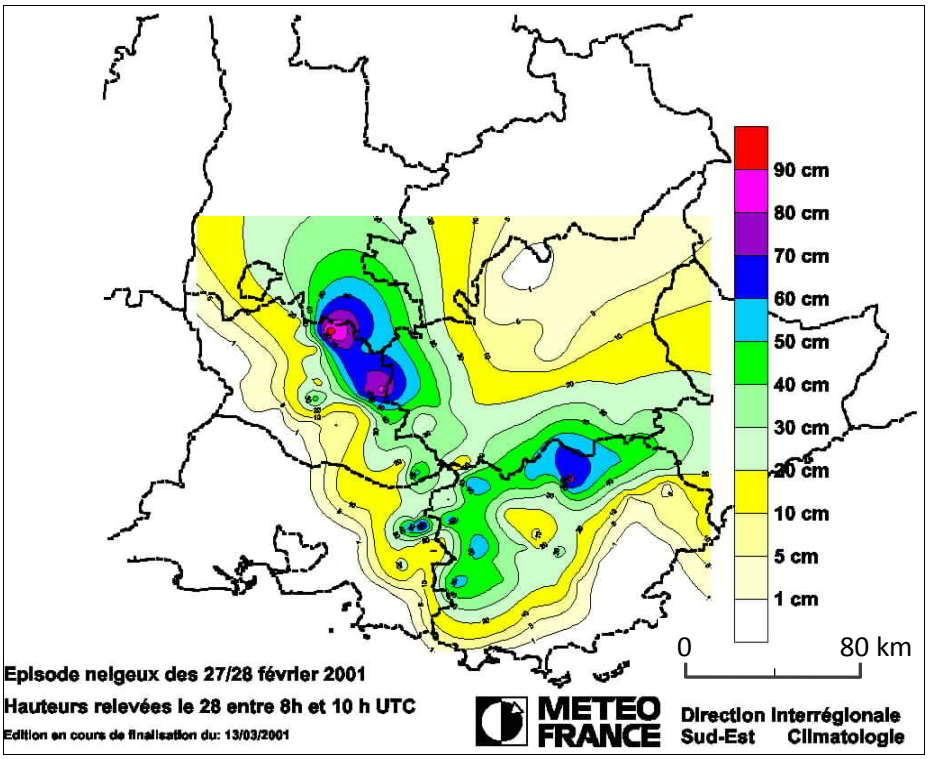
différentes. Dans le cas des incendies, l'aléa électrique conduit à une diffusion du phénomène à une autre échelle, un aléa local « mineur » devient une crise de plus grande ampleur. Dans le cas suivant, la problématique est différente dans la mesure où la surface couverte par l'aléa déclencheur est plus étendue que la surface impactée indirectement par les dysfonctionnements de réseaux, l'effet de réseau sur la forme spatiale du risque n'est pas un effet de diffusion à proprement parler, mais une sorte d'effet de fragmentation du système spatial conduisant à l'isolement de certains sous-espaces et à une sorte de paralysie du système territorial.

4.4. LA TEMPÈTE DE NEIGE DU 28 FEVRIER 2001 ET SON IMPACT SUR LES RÉSEAUX ET L'HABITABILITÉ DES TERRITOIRES VAROIS

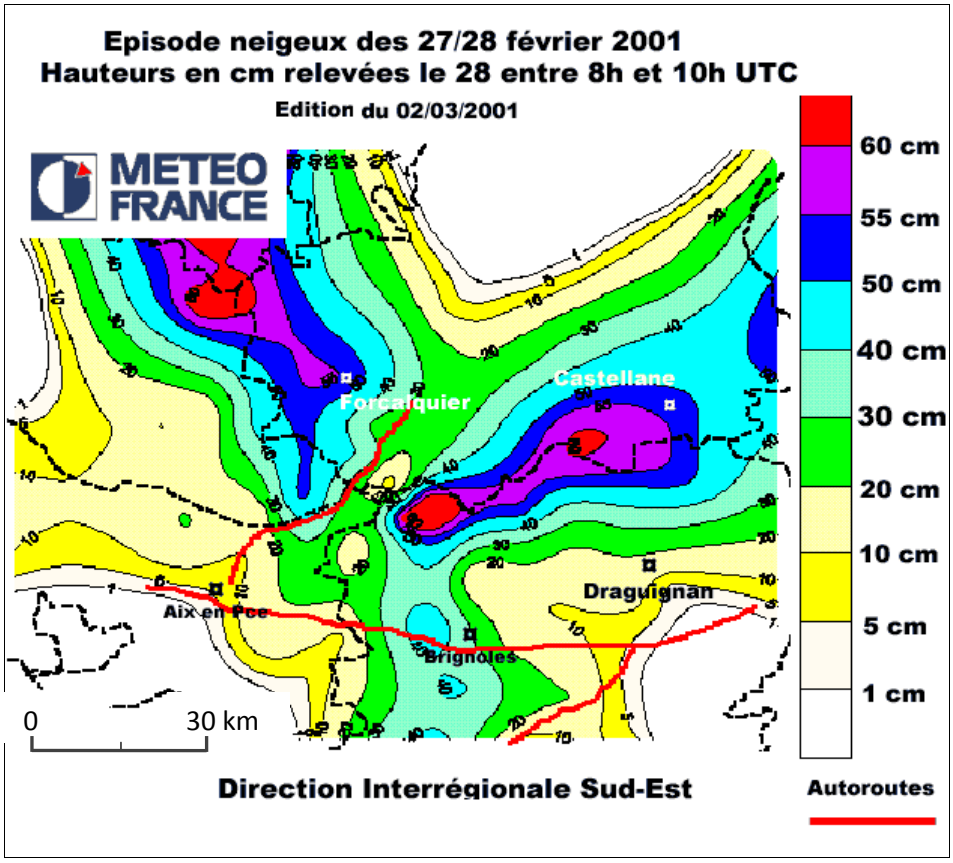
4.4.1. Le déclenchement et la diffusion du système de risque

De nature plus exceptionnelle que les cas précédents, l'épisode neigeux de la nuit du 27 au 28 février 2001 initie dans le département du Var, un système de risques à la fois plus grave, plus persistant et plus complexe en termes de répartition des dommages dans le Temps et dans l'Espace. Même si ces dommages ne sont pas exclusivement localisés dans ce département, nous avons fait le choix de nous concentrer spécifiquement sur les impacts en territoire varois, ce dernier apparaissant comme le plus impacté lors de cet épisode. Une attention particulière sera bien sûr portée aux endommagements des différents types de réseaux et sur la manière dont les interactions entre ces endommagements contribuent à une forte aggravation de la situation de crise et même à l'émergence d'impacts indirects portant sur des réseaux initialement non impactés par la tempête de neige. La spatialisation de la crise reste simple en termes de méthodologie et ne s'appuie pas sur les techniques permettant de prendre en compte l'incertitude et l'imprécision spatiale.

Si l'on s'intéresse d'abord strictement à la variabilité spatiale de l'épisode neigeux, celle-ci est structurée autour d'un gradient sud-nord, les précipitations neigeuses ont été de moindre importance dans les zones littorales que dans les zones intérieures du département, en particulier les zones du Haut Var et du Massif de la Sainte Baume où elles ont pu atteindre entre 40 et 80 centimètres de hauteur par endroit. D'après RTE, « cette neige dite « collante » a la propriété d'adhérer fortement aux objets ou surfaces qu'elle rencontre, par un phénomène de capillarité. L'accumulation qui en résulte peut conduire à surcharger considérablement les câbles des lignes électriques. (…) Cette surcharge entraîne la torsion des câbles qui, rapidement, se couvrent d'un manchon de section quasi-circulaire.» (RTE, 2001), dans les sections où cette surcharge dépasse un poids d'environ 5 kilogrammes par mètre (environ 4 cm), les lignes cèdent.



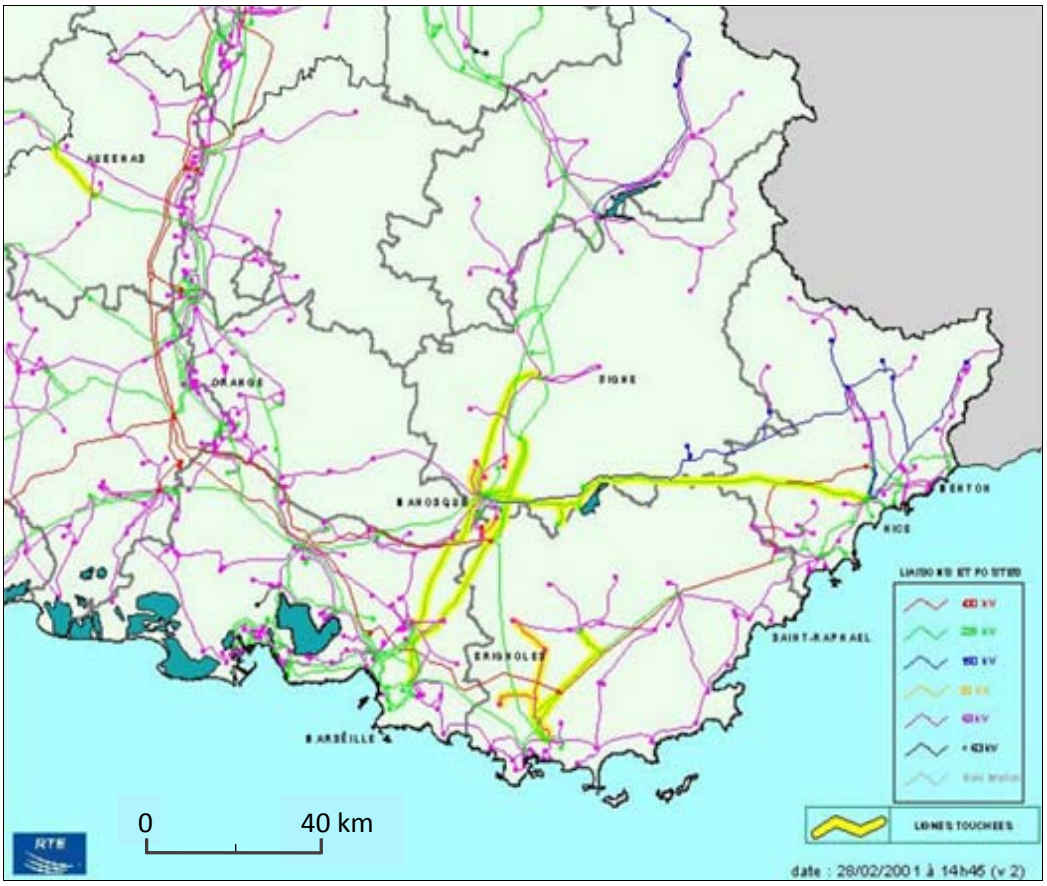
Carte 9 : Répartition des précipitations neigeuses de la nuit du 27 au 28 février à l'échelle du grand Sud Est (Source : Météo France, P. Carrega)



Carte 10 : Répartition des précipitations neigeuses de la nuit du 27 au 28 février autour du Massif de la Sainte Beaume (Source : Météo France, P. Carrega)

La carte 11, où figurent les endommagements physiques subis par les réseaux de transport électrique (RTE, 2001) signale, comme nous l'avions souligné, que l'impact initial dépasse largement le cadre du département de Var, avec notamment l'endommagement d'une ligne 225kV proche d'Aubenas, chef-lieu du département de l'Ardèche, ou de plusieurs lignes 225 kV en provenance des Alpes de Haute Provence. Au total, RTE dénombre quatre-vingt incidents sur le réseau de transport haute tension et des dommages directs sur une trentaine de pylônes, sur dix-huit lignes du réseau de transport à très haute tension de 63kV ou de 225kV, soit près de 300 kilomètres de lignes. Ces endommagements sont essentiellement concentrés autour d'une zone limitrophe du Var, des Bouches du Rhône, du Vaucluse et des Alpes de Haute Provence.

Pour le Var plus spécifiquement, on peut distinguer deux zones de concentration d'impacts des lignes de très haute tension : un premier ensemble concerne les lignes de la partie sud-ouest du département, notamment la liaison en 63 kV entre Toulon, Brignoles et Saint Maximin. Le second ensemble se situe plus à l'intérieur des terres, et porte sur les liaisons traversant la partie nord-ouest du département, à proximité du Massif de la Sainte Baume. Ces liaisons endommagées concernent le réseau 225 kV, elles n'alimentent pas uniquement le Var mais également la région marseillaise et la région niçoise. Pour autant, les coupures électriques dans ces deux dernières zones restent moins nombreuses et graves dans l'espace et dans le temps que celles subies dans le Var.



Carte 11 : L'endommagement des réseaux HT et THT par les intempéries de Février 2001, à l'échelle du Grand Sud est de la France. (Source, RTE 2001)

En plus de ces dommages aux réseaux de transport électrique, de très nombreux dommages sont également observés à l'échelle du réseau de distribution. Ainsi, il est possible qu'un réseau de distribution ne soit pas endommagé mais ne puisse pas fournir d'électricité à son territoire de desserte parce qu'en amont, le réseau de transport ne peut pas alimenter ce réseau de distribution ; tout comme il est possible qu'un réseau de transport ne soit pas endommagé mais ne puisse pas fournir d'électricité jusqu'à un territoire donné parce que le réseau de distribution en aval est quant à lui endommagé. Nous ne disposons pas d'informations précises et exhaustives sur la répartition spatiale des très nombreux dommages subis par les réseaux de distribution et nos recherches nous laissent penser qu'une telle base de données n'existe pas. Dans la meilleure hypothèse, sa « reconstruction » près de 10 ans plus tard, s'avèrerait complexe à mettre en œuvre et imposerait une masse de travail supplémentaire importante aux « affaires quotidiennes » des gestionnaires du réseau électrique (que ces derniers ne peuvent matériellement pas toujours consacrer à ce genre de travaux). Au pire, elle s'avérerait impossible à reconstruire *a posteriori* parce que dans l'urgence de la crise, l'ensemble des dommages et des travaux n'ont pas été recensés et/ou, que les archives ne comprennent pas d'informations « indirectes » suffisamment précises.

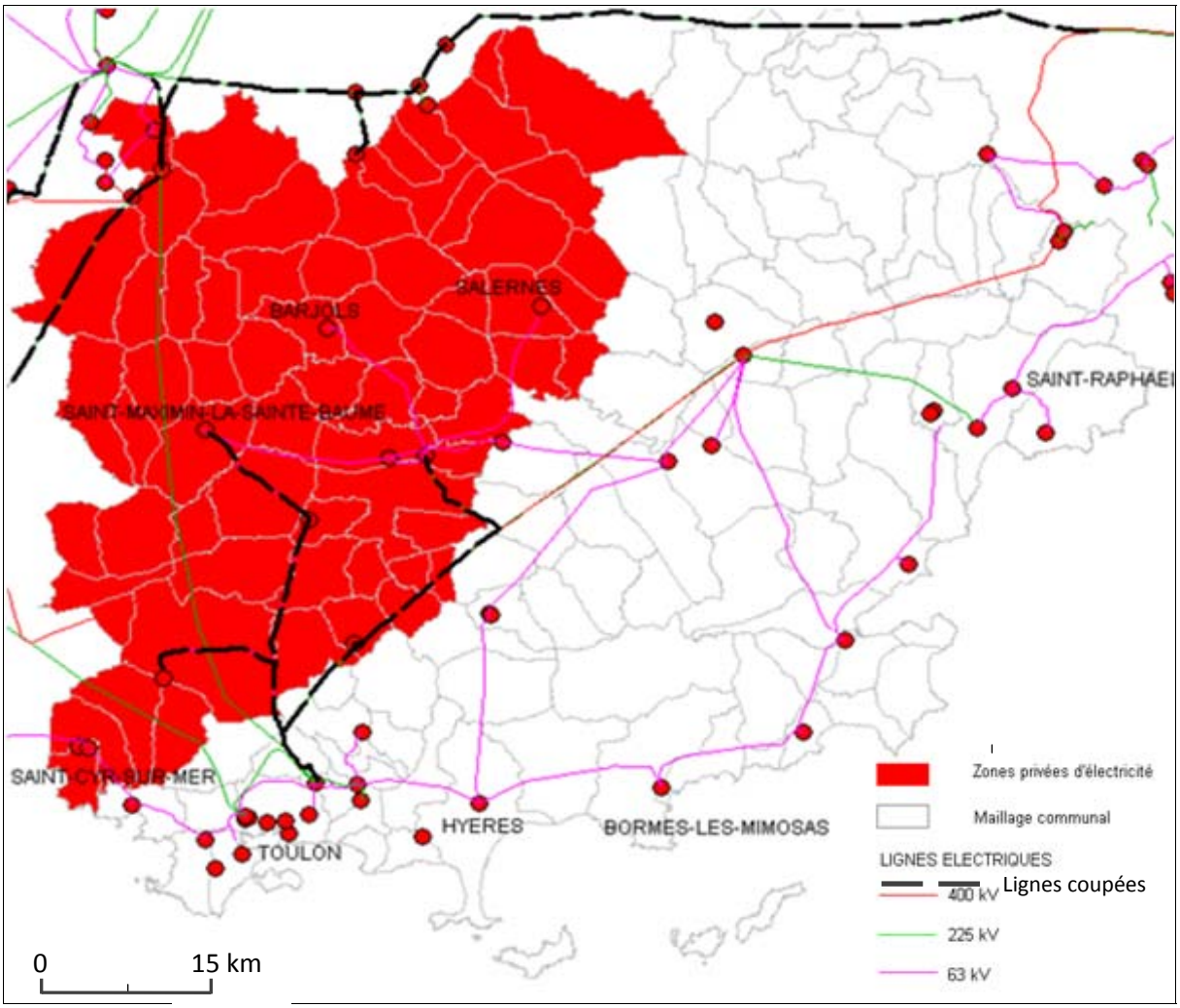
Pour passer de la cartographie des impacts aux réseaux électriques à la cartographie des territoires affectés par la coupure électrique, nous pouvons nous appuyer essentiellement sur les 13 communiqués de presses de l'époque (et donc 13 pas de temps du déroulement de la coupure), fournis gracieusement par les services d'ERDF. Entre autre information, ces communiqués décrivent l'évolution du nombre de clients coupés et pour certains, des informations sur la répartition spatiale, essentiellement, à l'échelle des communes d'un niveau de rétablissement du service électrique. Ces informations ont toutefois un fort caractère généralisant et imprécis, par exemple, les taux de desserte des communes sont des chiffres précis mais fortement arrondis (avec taux de desserte de 50, 80, 90 ou 100%) *idem* pour l'évolution du nombre de clients coupés arrondie en grands milliers. Cet élément est justifiable compte tenu de la source de ces informations, l'information brute a en quelque sorte été traitée pour un usage médiatique afin de transmettre aux populations une information facilement assimilable. Elle trouve aussi une raison liée à la connaissance imparfaite de la situation par les gestionnaires de réseaux et par l'ensemble des autorités. D'ailleurs, le recensement et les réparations des dommages sur les réseaux électriques ont dû s'appuyer dans certaines zones, sur plusieurs hélicoptères et des services de transport exceptionnel de l'Armée, afin de connaitre plus précisément les impacts dans certaines zones ou même d'acheminer des équipements électriques (en particulier des groupes électrogènes).

On peut alors considérer que cette imprécision de la connaissance de la crise diminue au fur et à mesure de son déroulement, dans le sens où la stabilisation de la situation et le déploiement progressif « d'observateurs » permet une amélioration de sa visibilité. Ainsi, alors que le premier communiqué de presse de 9 heures du matin est assez imprécis en terme spatial et désigne assez vaguement une sorte d'axe autour de trois communes, celui de 12 heures est déjà plus précis et s'appuie sur le découpage cantonal, et les suivants s'appuient sur un découpage communal. Malgré l'unicité de la source, se pose déjà en théorie un problème de fusion d'informations spatialement hétérogènes en termes de précision et de granulométrie. En termes de précision spatiale, on trouve des informations à l'échelle des cantons, des

communes et une ou deux désignations imprécises comme « la région la plus à l'Ouest du Var autour de St Maximin et jusqu'au Verdon », ou encore, « la zone nord-ouest restera privée d'électricité dans une zone allant de Signes à Aiguines ». Ce problème d'imprécision est dans ce cas précis amoindri par le fait que généralement, pour un même pas de temps, l'information conserve une certaine homogénéité (par exemple dans le second communiqué de presse, l'information est exclusivement à l'échelle des cantons ; alors qu'à partir du troisième elle s'appuie surtout sur le découpage communal) tout en traitant de communes au nombre relativement limité, et proches.

La carte 12 traite de zones décrites comme étant celles « principalement touchées » par la coupure électrique le 28 février au matin, le premier communiqué de presse évoque 70 000 clients touchés. Le nombre total d'habitants de la zone décrite correspond à environ 130 000 personnes, l'écart observé s'explique de plusieurs manières. D'une part, les clients résidentiels sont à l'échelle des ménages, cela revient donc à considérer que si l'ensemble de la zone considérée était coupée, en prenant la taille moyenne réelle des ménages varois de 2,2, alors 70 000 * 2.2 = 154 000 personnes. Cet élément laisse penser que la carte 12 sous-estime la forme spatiale impactée par la coupure tout en restant plausible.

D'autre part, il faut également considérer que même si elles sont peu nombreuses dans cette zone essentiellement tournée vers l'activité résidentielle, il existe tout de même quelques activités industrielles et tertiaires ; en considérant qu'environ 20 % des clients impactés sont des clients résidentiels, alors 56 000 * 2.2 = 112 000 ; ce nouvel élément laisse penser que la carte 1 surestime la forme spatiale impactée par la coupure tout en restant plausible. Mais il suffit qu'on considère 10% de clients tertiaires et industriels pour que : 64 000 * 2.2. = 140 800, et que le résultat apparaisse à nouveau comme sous-estimé. Le raisonnement reste avant tout illustratif et s'appuie sur des chiffres partiellement imprécis, il montre néanmoins que la carte présentée reste empreinte d'imprécision tout en étant plausible. Comme nous l'avons souligné, cette imprécision n'apparaît pas explicitement dans les traitements spatiaux et les résultats proposés dans ce chapitre.

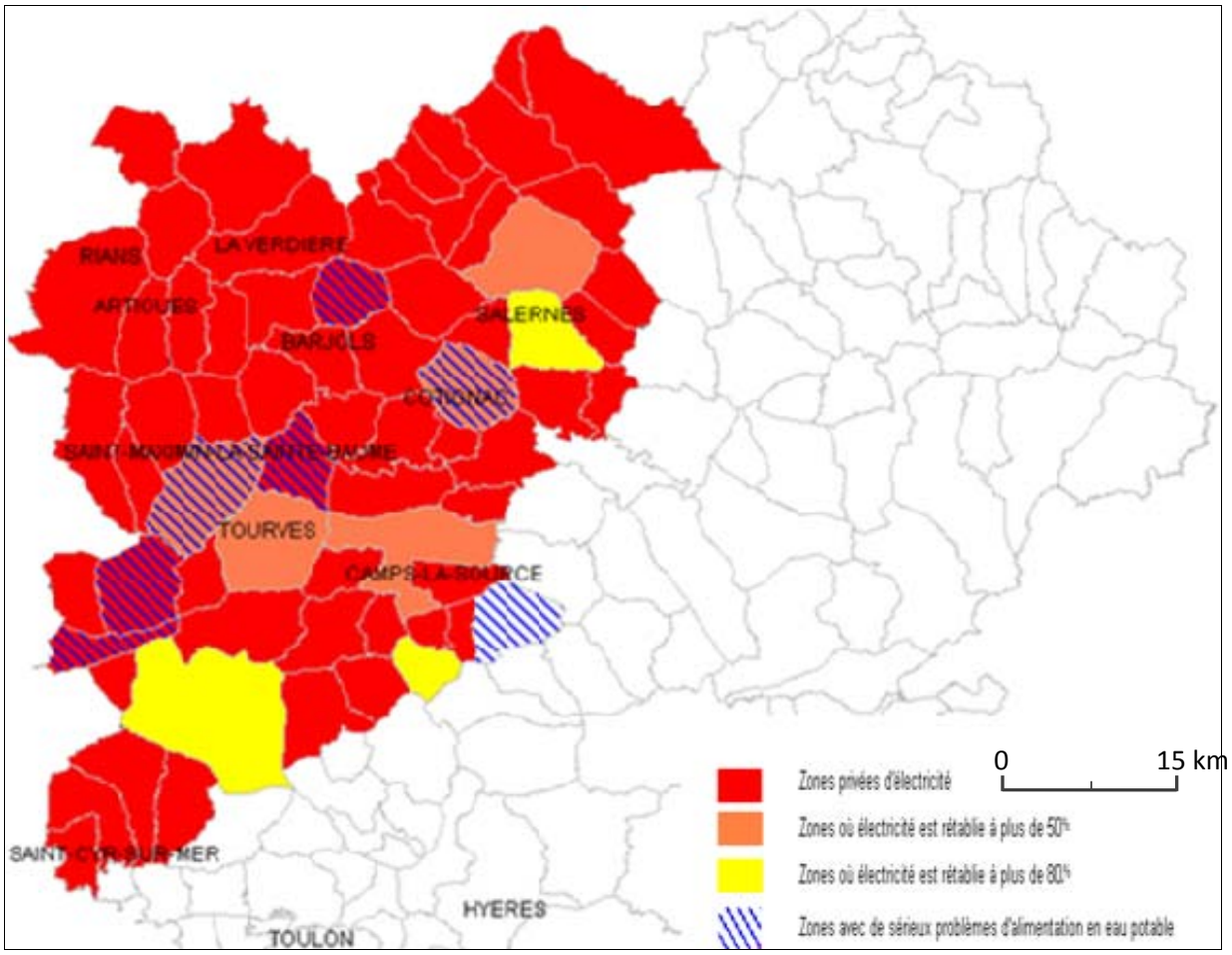


Carte 12 : Réseau de transport électrique du département varois, lignes électriques endommagées et périmètre impacté par la coupure au temps T1 le 28 février au matin (70 000 clients touchés).

La délimitation spatiale obtenue laisse penser à une limite nette et précise de la coupure électrique qui, comme nous le verrons, correspond aux données existantes mais ne correspond pas à la réalité. Cet effet très net des discontinuités est clairement accentué par le parti pris initial de travailler spécifiquement sur le cas Varois et donc de ne pas considérer d'effet de bord. Pour autant, cette forme possède une certaine cohérence et reste pertinente quand on la croise aux dommages directs relevés par RTE sur le réseau de transport électrique. La coupure n'impacte pas le littoral et l'effet de diffusion des endommagements initiaux est d'assez faible portée. Il existe néanmoins puisque certaines zones connectées à des lignes très haute tension en état de fonctionnement sont tout de même impactées par des coupures électriques (les communes de Barjols et Salernes par exemple).

4.4.2. La restauration électrique et l'émergence de nouvelles situations à risques

Parmi les impacts indirects de cette coupure électrique sur les autres réseaux techniques, un des effets dominos les plus intéressants à observer concerne sans aucun doute le réseau d'eau potable qui n'avait pas été directement impacté par la tempête de neige. Sur un plan temporel, on note d'abord que cet impact indirect apparaît à plusieurs pas de temps et de manière différente selon les communes. Pour la commune de Besse sur Issole par exemple, on sait d'après les propos du directeur de l'agence de la Générale des Eaux en charge de l'ouest varois, rapportés dans Var Matin, que la commune a été partiellement privée d'eau potable le mercredi matin mais a été réalimentée dès l'après-midi du premier jour de crise, alors que pour les communes de Nans les Pins, Plan d'Aups ou Tavernes notamment, les problèmes d'alimentation en eau potable ont persisté davantage. Pour les communes de Garéoult, Bras et Gignac, les problèmes d'eau potable ne se posent pas immédiatement mais sont susceptibles d'apparaître au bout d'une certaine durée de coupure électrique, en cas d'épuisement des stocks de réserves d'eau potable. La carte suivante présente l'état de l'approvisionnement électrique des communes et les communes concernées par un problème d'eau potable le jeudi 1er mars à 22 heures, soit 40 heures après notre hypothèse de début de coupure ; à cette heure-ci, environ 30 000 clients sont encore impactés par la coupure électrique.



Carte 13 : Evolution de la coupure électrique et émergence du risque de coupure d'eau potable au temps T2, le Jeudi 1er Mars 22 heures (H+40) (près de 29 000 clients touchés).

Dans les valeurs du nombre d'heures de coupures, nous considérons que la coupure électrique a débuté de manière simultanée à 9 heures du matin, ce qui est en soit inexact et qui sous-estime de quelques heures la durée de la crise. Néanmoins, nous ne disposons pas d'informations plus précises sur la chronologie fine et l'ordre des endommagements directs au cours de la nuit du mardi 27 au mercredi 28 février. Nous assumons donc de prendre pour point de départ commun à l'ensemble de la coupure dans le département, la date et l'heure du premier communiqué officiel sur la panne, c'est-à-dire mercredi 28 février, 9 heures du matin. Même en l'absence de données, une connaissance et une analyse fine de la météorologie de cette nuit du 27 au 28 pourraient permettre de localiser dans le temps et dans l'espace avec plus de précision, la chronologie des endommagements directs et le déclenchement de la coupure électrique.

La restauration du service électrique s'est appuyée sur des moyens humains très importants, faisant appel en renfort à des techniciens électriques venant d'autres départements (de l'Isère, de la région bordelaise ou des Alpes-Maritimes) et dont le déploiement a été progressif tout au long de la crise. Au total, les moyens humains déployés par les gestionnaires électriques passent progressivement de 400 personnes et 250 véhicules au début de la crise, à plus de 1200 personnes et 450 véhicules en fin de crise. Si on établit un rapport entre l'évolution du nombre d'agents techniques sur le terrain et l'évolution du nombre de clients restaurés pour chaque pas de temps, on peut proposer un indice sur l'évolution du rythme horaire du nombre de clients raccordés au réseau électrique. On voit dans la figure 37 que ce rythme horaire tend à décroître de manière très brutale au cours de la crise ; après avoir approché 5 clients par agents lors des premières 24 heures, il tend à plafonner à un rythme inférieur à 1 client par heure à partir des 36 premières heures.

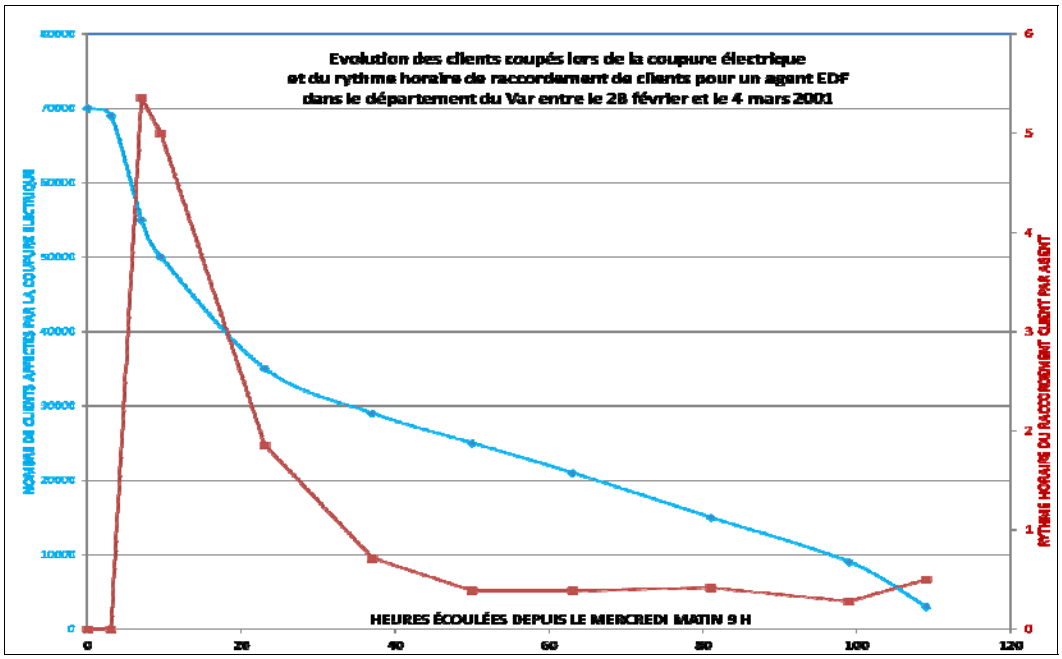


Figure 37 : Evolution du nombre de clients coupés (en bleu) et évolution du rythme horaire de raccordement de clients pour un agent technique (en rouge) au cours des 120 heures de crises à partir du mercredi matin à 9 heures.

Cet indice est évidemment une valeur moyenne et ne correspond pas à la réalité du travail « des lignards » qui est d'ailleurs généralement effectué en équipe. Il nous renseigne

néanmoins sur le caractère non linéaire de l'évolution du nombre de clients impactés qui traduit une stratégie d'aller en premier lieu vers les points plus critiques, afin d'effectuer d'abord la réparation des clients prioritaires avec des risques vitaux, puis les réparations qui permettent de raccorder le plus grand nombre possible au réseau.

4.4.3. La question de l'accessibilité routière et ses effets sur la durée de la coupure électrique et la persistance du système de risque

Une contrainte forte dans la mise en œuvre de cette stratégie vient de l'inaccessibilité des zones et des infrastructures endommagées qui explique largement l'évolution lente de la restauration du service électrique. Ainsi, l'endommagement de plusieurs lignes électriques, combiné à l'obstruction de plusieurs sections de voirie routière, conduisent à une forte persistance de la crise, l'inaccessibilité de certaines zones empêchant leur restauration rapide (on retrouve l'idée de résilience telle que présentée en chapitre 3). Cette question de l'accessibilité routière se pose à deux niveaux.

Au niveau du réseau autoroutier et donc sur le délai d'arrivée des renforts des autres départements ; l'arrivée des renforts en provenance de l'Isère et des groupes électrogènes de la région bordelaise a d'ailleurs lieu le jeudi matin, comme les renforts en provenance de Nice et Cannes. Les dommages sur le réseau autoroutier ont été particulièrement critiques dans la section entre Saint Maximin et les Arcs, avec notamment plusieurs camions qui « piétinaient » dans la montée de Saint Maximin ; le 28 février à 20 heures, les responsables gestionnaires du réseau autoroutier ESCOTA demandaient aux camions d'arrêter leur voyage. A 22 heures, un poste de transmission ESCOTA était foudroyé et altérait la communication entre le PC de crise localisé à Mandelieu et les 82 véhicules de terrains. A 22h30, le Préfet du département du Var interdisait la circulation routière sur l'Autoroute A8 : entre 2000 et 3000 poids lourds étaient reportés essentiellement vers la ville de Toulon, mais surtout, entre 2000 et 4000 personnes se retrouvaient bloquées sur « l'autoroute du Soleil ».

Dans une entrevue avec Richard Bertoli, directeur de l'exploitation du réseau autoroutier, ce dernier nous avait d'ailleurs appris qu'un important retour d'expérience avait été mené par ESCOTA, suite à cette crise. Il avait également insisté sur l'importance de mesures d'anticipations comme le stockage de quantités très importantes de bouteilles d'eau ou de couvertures pour réduire les risques vitaux associés à pareille situation de crise, qui malgré son caractère exceptionnel devait, de par sa criticité, faire partie des situations tenues comme possibles par les gestionnaires.

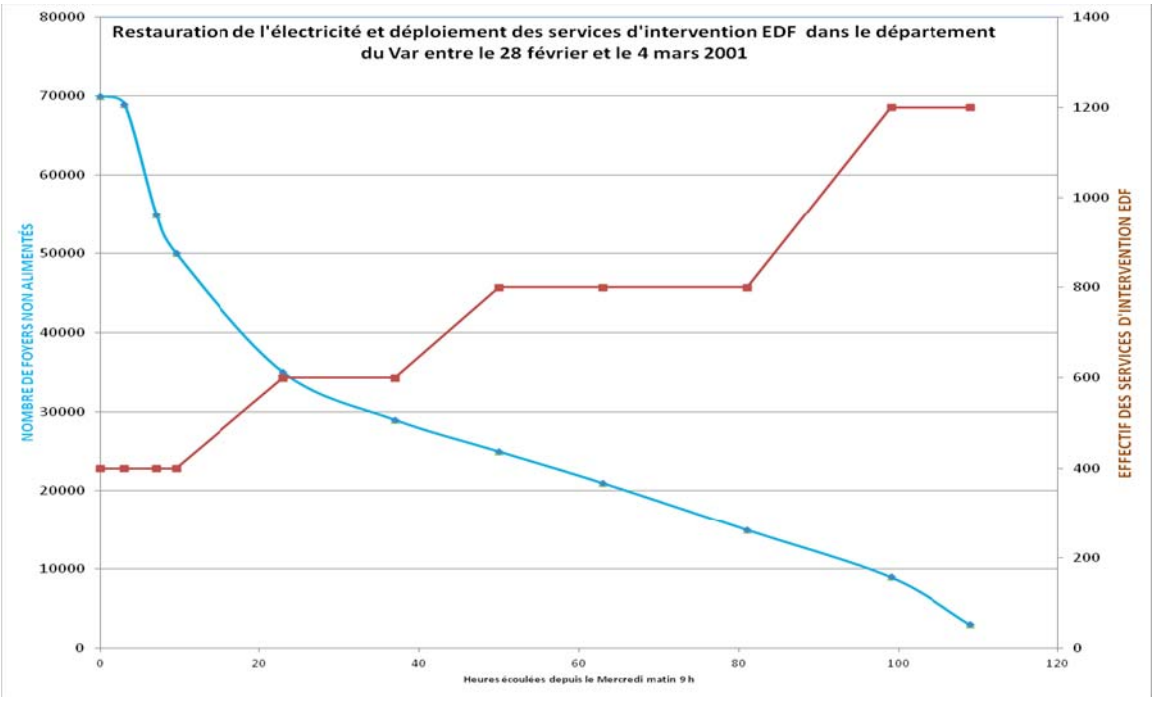
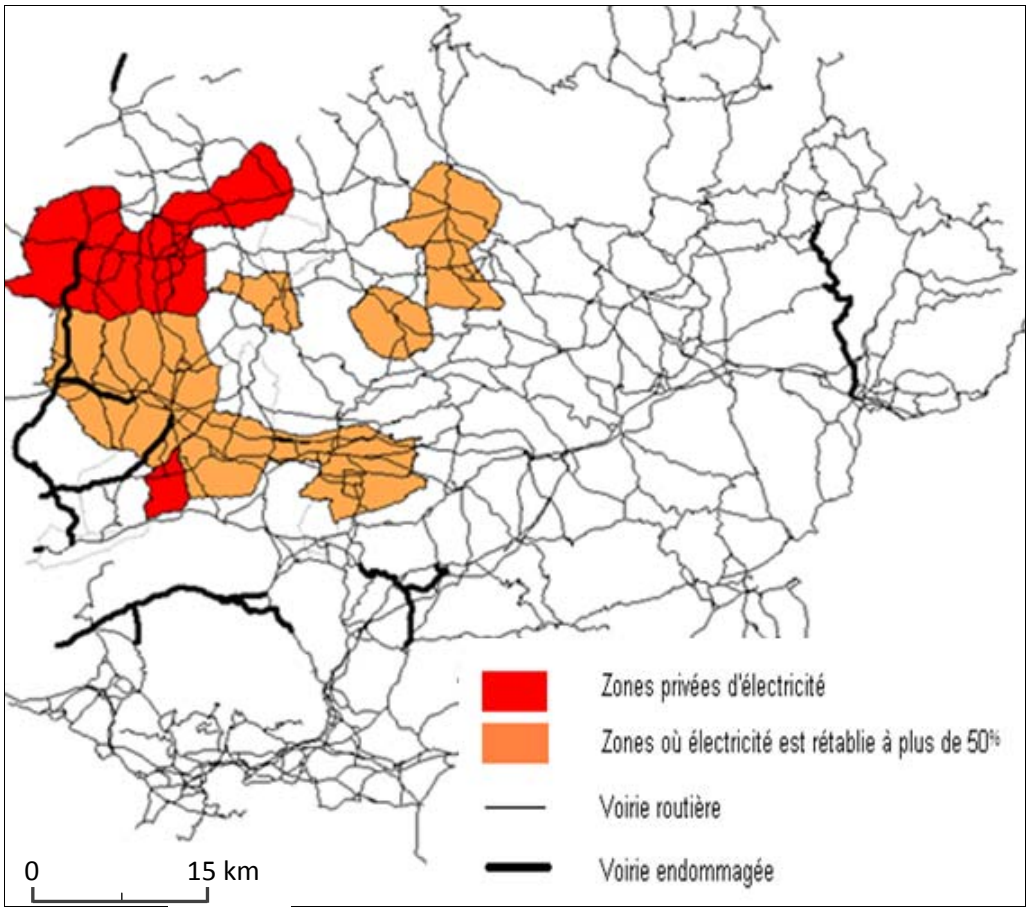


Figure 38 : La restauration de l'électricité et le déploiement progressif des services d'intervention EDF avec l'arrivée des renforts des départements de l'Isère et des Alpes-Maritimes.

Au niveau des routes internes, les dommages sont également très nombreux et localisés dans la partie ouest du département et aux alentours du Massif de la Sainte Baume. La description très détaillée des dommages routiers et de l'état des liaisons de communes à communes dans le journal local (annexe) nous permet de proposer une cartographie simple à partir de la base de données Route 500 de l'IGN. En croisant cette information avec les communes déclarées encore coupées le vendredi 2 Mars vers 23h30 dans les communiqués de presse, soit près de 63 heures après le début de la coupure, on peut supposer un lien de causalité entre la non accessibilité de ces zones et le non réapprovisionnement en électricité pour près de 20 000 clients (carte 14).



Carte 14 : Les dommages routiers et la durée de coupure électrique dans le département du Var le vendredi 2 mars en fin de soirée.

Figure 39 : Photographie du travail des équipes de secours en provenance de l'Isère partiellement entravé par l'enneigement de la voirie lors de la panne de février 2001 dans le Var (Source : Service de presse ERDF).

Figure 40 : Photographie de l'arrivée d'un camion grue et d'équipes de secours après le déneigement des voiries routières. (Source : Service presse ERDF).

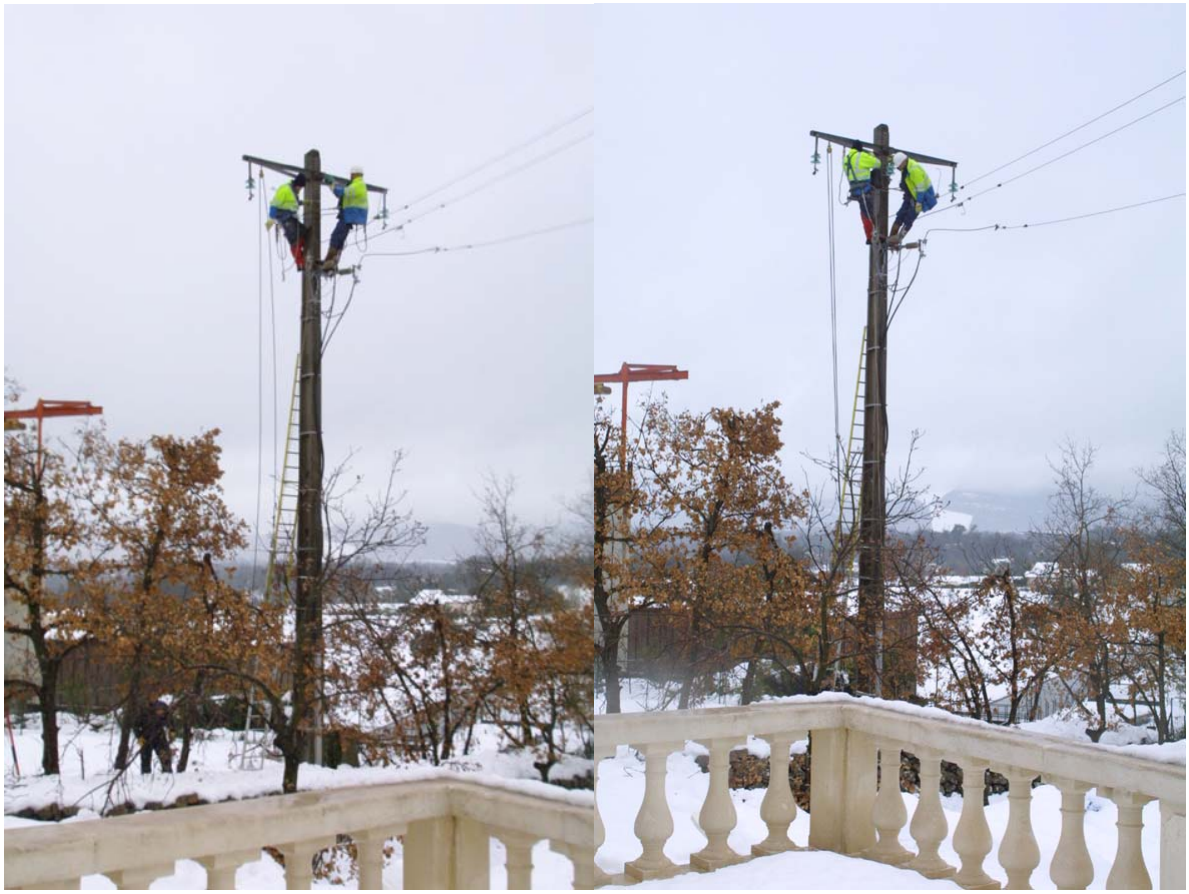


Figure 41 : Deux techniciens en plein travaux acrobatiques à plus d'une quinzaine de mètres du sol sur une ligne du réseau de distribution électrique. (Source : Service presse ERDF).

Conclusion

Même s'il ne s'agit que d'un scénario possible parmi de nombreux, cette première analyse rétrospective nous permet de préciser de manière plus aboutie les différents types d'interactions possibles des dommages aux réseaux techniques dans les systèmes de risques (figure 42). L'impact du réseau de transport routier sur le réseau électrique ne conduit pas directement à de nouveaux endommagements électriques ni à une rediffusion du risque dans l'espace mais à une aggravation du risque par rediffusion du risque dans le temps. L'effet de réseau porte sur la durée, on pourrait parler d'un effet de prolongation du système de risques.

L'impact du réseau électrique est également complexe en termes de durée dans le sens où comme nous l'avons vu, certains dysfonctionnements du réseau potable, liés aux coupures électriques ne peuvent apparaître qu'au bout d'une certaine durée de la coupure (qui dépasse le stock d'eau disponible dans un réservoir par exemple). L'effet de réseau possède à nouveau un rapport complexe avec la question du temps, tout en ayant cette fois un effet potentiel en termes de rediffusion d'impact dans l'espace. On comprend alors que dans ce scénario, indirectement, l'impact au réseau de transport routier joue un rôle prépondérant dans le déclenchement de l'impact réseau potable, puisque c'est lui qui contribue à aggraver fortement la durée de la coupure électrique.

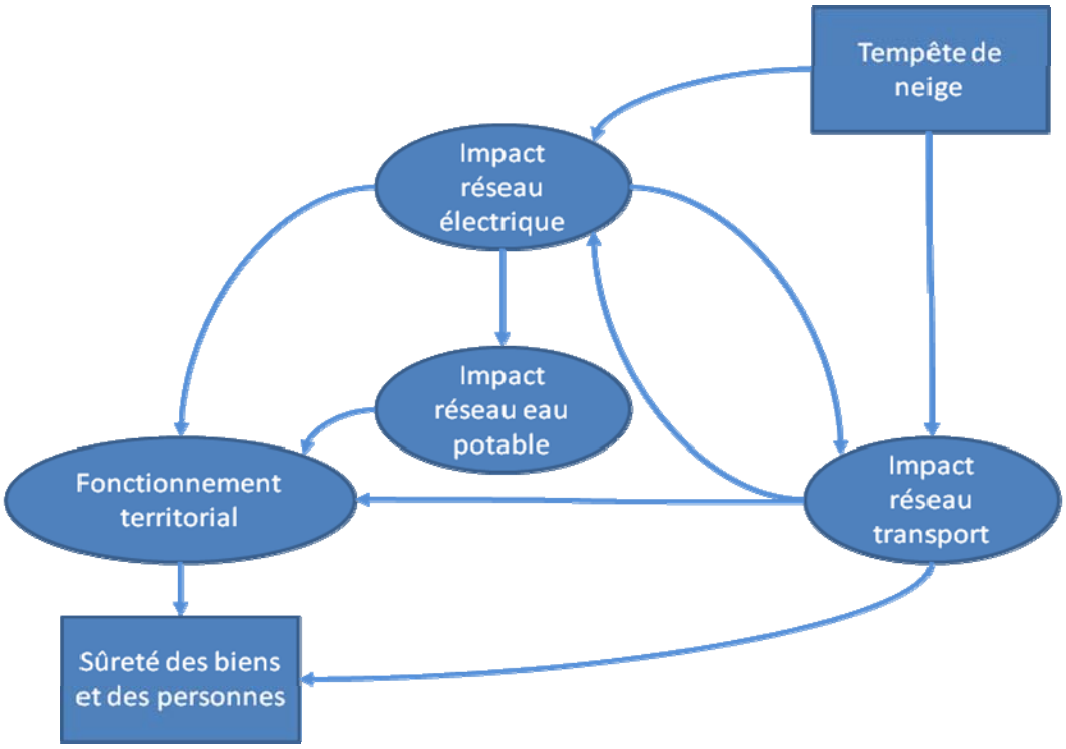


Figure 42 : Impacts et interdépendance des réseaux techniques dans le système de risques du 28 février au 4 mars 2001, dans le département du Var.

A l'échelle de la région PACA, l'articulation entre la temporalité de la construction d'une fragilité électrique dans le temps long, induit par le développement des territoires et des réseaux techniques (1960-2005), avec la temporalité plus brève et évènementielle du déclenchement des systèmes de risques induits par cette fragilité, témoigne d'une forme de complexité temporelle des systèmes de risques. L'anticipation des systèmes de risques nous conduit donc à raisonner sur les interactions entre deux temporalités bien distinctes, renvoyant à la construction du système de risques d'une part, et au déclenchement du système de risques d'autre part.

La complexité temporelle des systèmes de risques observée dans ce chapitre est doublée d'une complexité spatiale forte puisque le territoire électrique PACA est lui-même imbriqué dans plusieurs niveaux supérieurs de territoires électriques qui sont, nous l'avons vu, susceptibles d'être déstabilisés dans leur ensemble par des perturbations locales et susceptibles de perturber les autres réseaux en aval. Cette fragilité s'avère importante en région PACA du fait de la structure du réseau de transport électrique et de la relativement faible quantité des moyens de production électrique installés dans la région. De plus, le territoire électrique PACA se caractérise par un niveau important d'hétérogénéité qui conduit à un niveau de fragilité plus important dans la partie Sud-Est de la région. Cette fragilité électrique, constituée dans le temps long, rend possible, à certaines périodes, le déclenchement de coupures électriques importantes même si la perturbation initiale est de faible intensité et localisée très localement. De plus, comme le montre le cas des incendies en région PACA, de légères variations dans la localisation de l'aléa de départ peuvent avoir un impact très important sur la diffusion spatiale des dommages indirects, ce qui confirme le haut degré d'incertitude des systèmes de risques associés aux dommages des réseaux évoqué dans la partie 1.

La spatialisation rétrospective des systèmes de risques est menée dans une démarche « classique » et les données dont nous disposons pour reconstruire ces évènements ne justifient pas réellement le recours aux méthodes évoquées au chapitre 3. Pour autant, comme nous l'avons noté, l'imprécision des données dont nous disposons nous conduit à généraliser de manière importante les périmètres coupés et leur évolution temporelle. Dans le chapitre suivant, nous nous attacherons à prendre en compte de manière plus explicite, les enjeux d'imprécision, d'incomplétude et d'incertitude, associés à la connaissance des interdépendances réseaux-territoires et de l'interaction entre ce système et une perturbation externe.

CHAPITRE 5 :

SCRED, APPLICATION DANS UNE LOGIQUE POSSIBILISTE ET ANTICIPATIVE DANS LA MÉTROPOLE DE MARSEILLE

Introduction

Ce chapitre reprend dans son ensemble la méthode SCReD appliquée aux systèmes de risques de coupure électrique dans la commune de Marseille et dans un contexte d'inondation. Si dans le cas précédent, nous avons porté une attention particulière à l'endommagement des réseaux techniques par une perturbation externe, c'est-à-dire à la composante susceptibilité, dans ce chapitre, notre intérêt porte d'abord sur l'analyse de la criticité et de la dépendance dans les systèmes territoires - réseaux. La première sous-partie s'attache donc à mettre en œuvre une méthode de modélisation spatio-réticulaire permettant de traduire le caractère à la fois imbriqué et incertain de ces interdépendances. Pour traduire ces relations multi-niveaux, nous nous appuyons sur la localisation d'éléments ponctuels (poste électrique de différents niveaux, centroïde des bâtiments de différents types d'activités) à partir desquels les relations de distance entre l'ensemble des éléments ponctuels dans des sous-structures imbriquées déterminent un niveau de possibilité de relations d'élément à élément. On retrouve la logique d'organisation spatiale de l'interdépendance territoire - réseau technique telle que décrite aux premier et second chapitres et les notions de criticité et de dépendance décrites dans le troisième chapitre.

L'aléa inondation est davantage à considérer comme une sorte de « prétexte » au déclenchement du système de risques que comme le véritable objet de l'analyse. Tout le processus climatologique et pluviométrique en amont n'est pas inclus dans ce chapitre ; l'aléa déclencheur est avant tout appréhendé en termes de spatialité et de degré de possibilité d'apparition d'un dommage dans l'espace. Les trajectoires spatiales possibles des effets dominos successifs à ces dommages initiaux sont ensuite évaluées de manière à identifier des espaces à enjeux en termes de susceptibilité, de criticité, de résilience et de dépendance du territoire vis-à-vis du système de risque associé à l'inondation dans la commune de Marseille.

Ensuite, d'un point de vue rétrospectif, l'analyse de la mémoire des effets de l'inondation sur le fonctionnement des réseaux électriques et l'incidence des coupures électriques sur les sociétés humaines s'appuie en partie sur des résultats du programme de recherche Risque Décision Territoire (MEDAD, 2006), « Mémoires, oublis et (ré)appropriations : le risque inondation dans la basse vallée du Rhône et l'agglomération marseillaise.» (Claeys et al., 2009). Dans le cadre de ce projet pluridisciplinaire associant une partie des équipes arlésienne, marseillaise, et niçoise de l'UMR ESPACE, la « contribution » géographique (Voiron, Dutozia, 2009) portait de manière plus ciblée sur l'analyse du risque inondation dans la commune de Marseille et sur la spatialisation des impacts directs et indirects des inondations, avec une attention spécifique aux dysfonctionnements des réseaux techniques.

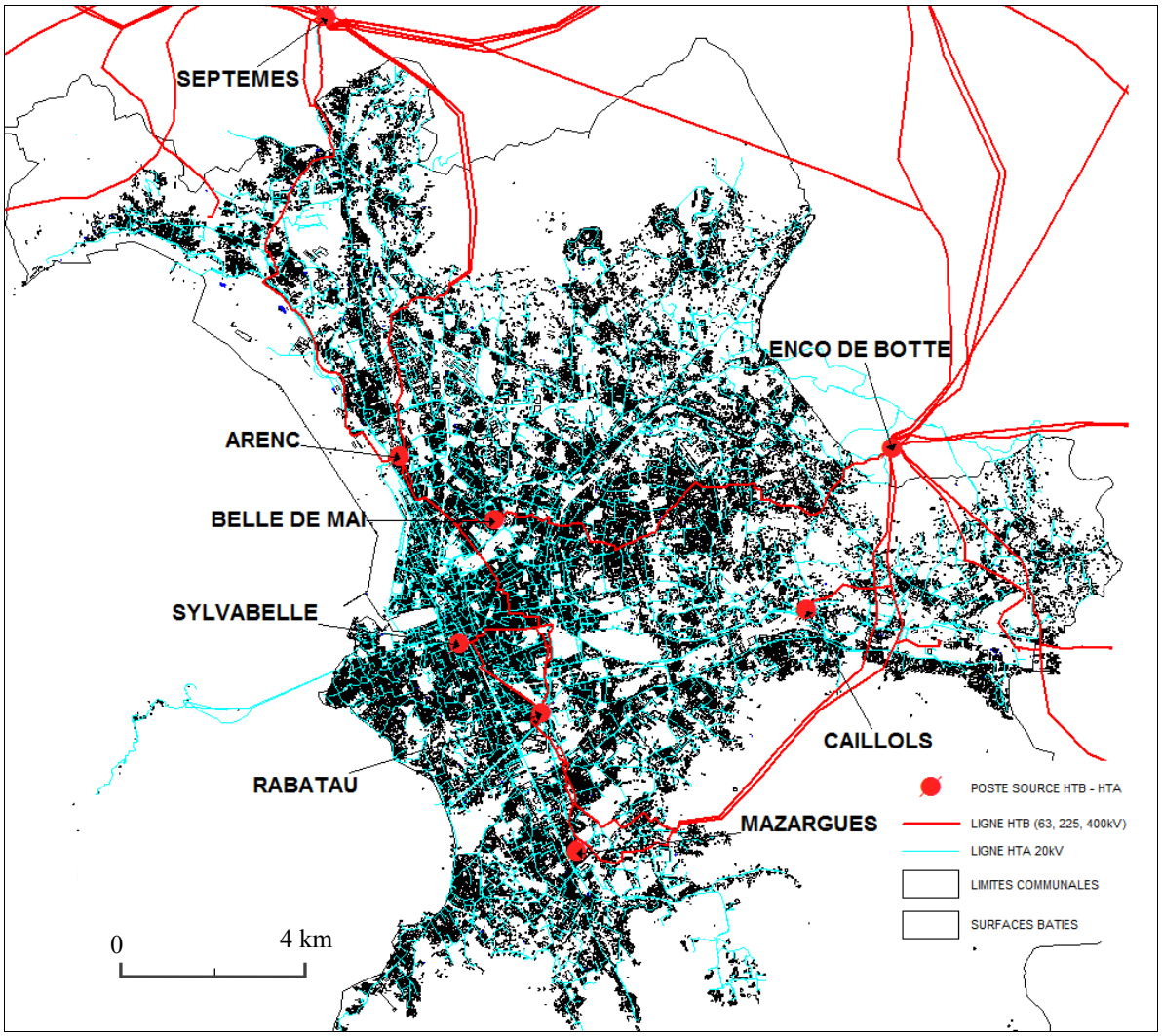
Sur le terrain marseillais, la collaboration avec l'historienne Martine Chalvet, nous a permis de mettre en place une connaissance spatialisée de la répartition des dommages des principales inondations connues dans la commune marseillaise à l'échelle d'un siècle (1907, 1951, 1972, 1978, 1993, 2000, 2003) alors que la collaboration avec les sociologues Cécilia Claeys, Claire De Montis et Ludovic Azibi a permis d'analyser la mémorisation des effets dominos vécus par les riverains lors des inondations avec la construction d'un questionnaire incluant des questions sur les dommages aux réseaux sur Marseille, diffusé auprès de 1000 personnes. D'autre part, grâce aux entretiens réalisés auprès de différents acteurs de l'exploitation, la gestion ou la cartographie des réseaux de distribution (ERDF Marseille), de transport électrique (RTE, Agence de Conduite Régionale PACA Ouest) et d'eaux (SERAM), et grâce à un stage de trois jours dans les services de ERDF Marseille, nous avons pu appréhender la mémoire formelle et informelle des inondations chez les gestionnaires de réseaux techniques et la mobilisation de cette mémoire dans la gestion et l'exploitation des réseaux techniques. Au final, l'ensemble de cette connaissance rétrospective sur la mémoire des effets dominos, croisé à la connaissance du fonctionnement des interdépendances territoires - réseaux et de leur organisation spatiale (qu'on admet imprécise et incertaine depuis le chapitre 3), nous renseigne sur la susceptibilité, la criticité et la dépendance des systèmes de risques.

5.1. LES INTERDÉPENDANCES RÉSEAUX – TERRITOIRES DANS LA COMMUNE DE MARSEILLE

5.1.1 La criticité et les interdépendances spatiales induites par l'organisation des réseaux techniques et des territoires

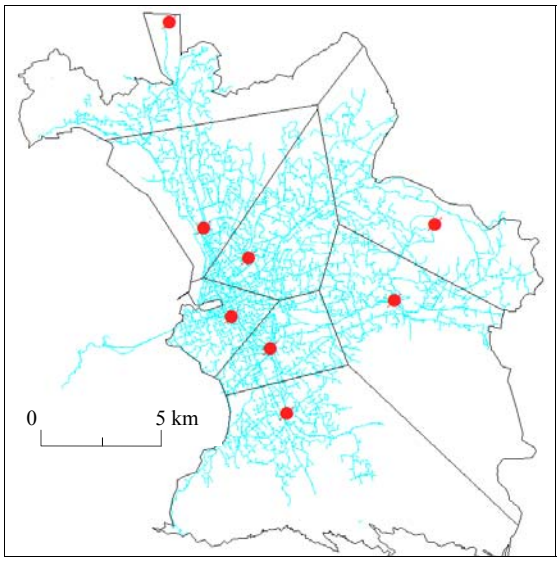
5.1.1.1 L'approvisionnement électrique de Marseille par le réseau de transport électrique, premier niveau d'imbrication spatiale

La commune de Marseille, comme l'ensemble des grandes agglomérations françaises, est alimentée directement par le réseau de transport électrique en très haute tension, de fait, des postes sources qui vont recevoir cette électricité en très haute tension sont nécessairement implantés dans la commune et à ses alentours. Pour le cas de Marseille (carte 15), à partir des données fournies par le gestionnaire ERDF Marseille (nous reviendrons sur les prétraitements importants et chronophages pour passer d'une information sur les réseaux, construite dans une logique de plan, à une information plus orientée vers la modélisation spatiale en annexe Y), nous pouvons cartographier huit postes sources dont sept sont alimentés par une ou plusieurs lignes 225kV alors que seul le poste de Sylvabelle est alimenté en 63kV avec une ligne 63kV bouclée entre le poste Sylvabelle et Rabatau ; parmi ces huit postes, six sont implantés directement sur la commune (Arenc, Belle de Mai, Sylvabelle, Rabatau, Mazargues, Caillols) alors que deux se situent en bordure proche (Enco de Botte, Septemes) mais leur importance pour l'alimentation de la commune justifie leur prise en compte. Ces postes de transformation diminuent le niveau de tension et alimentent un réseau dit moyenne tension (20kV) qui représentait en 2009 près de 1700 kilomètres de réseaux.

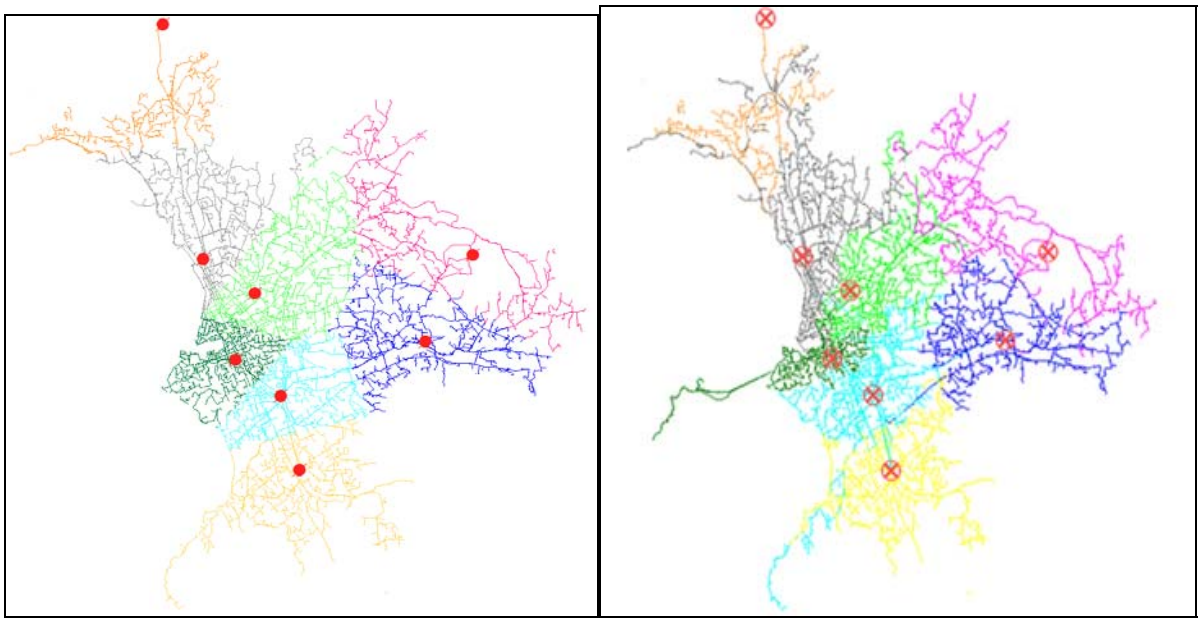


Carte 15: Alimentation électrique de la commune de Marseille (les limites du bâti sont restreintes à la stricte commune marseillaise)

Contrairement au chapitre 6, nous ne prenons pas en compte ici la différenciation des niveaux de tension et de connexité des lignes, à l'échelle des postes de transformation HTB-HTA. A partir de ces postes sources considérés de manière strictement identique, nous appliquons donc la méthode des diagrammes de Voronoï simples et non pas pondérés telle que décrite au chapitre 3. Ces diagrammes de Voronoï sont réalisés à partir du logiciel MapInfo et sont « contraints » en définissant comme « cible » le découpage communal modifié légèrement, de manière à intégrer l'ensemble des postes du réseau de transformation et le réseau de moyenne tension. En raison de son caractère spécifique, la partie du système électrique dédiée à l'approvisionnement de l'Archipel du Frioul (86 habitants) n'est pas considérée dans la suite de l'analyse. A partir de la partition de Voronoï, nous procédons à la segmentation du réseau moyenne tension, en considérant que les lignes qui appartiennent à la cellule de Voronoï d'un poste donné sont alimentées par ce poste. Ces traitements sont également réalisés à partir du logiciel MapInfo et de requêtes SQL simples.



Carte 16 : Polygones de Voronoï à partir des postes sources contraints par limite communale de Marseille.



Carte 17 : Partitions de Voronoï, 17a. à gauche et organisation des secteurs d'après la base de données d'ERDF sur le réseau électrique, 17b. à droite.

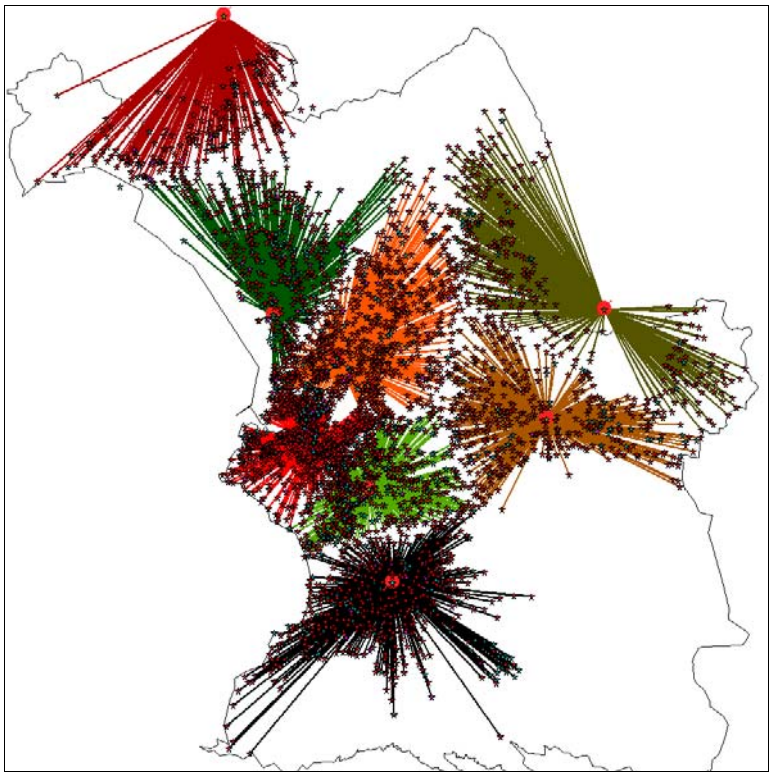
Dans le cas de Marseille, nous avons pu bénéficier, dans les bases de données spatiales fournies par ERDF, d'informations sur la dépendance des différents segments du réseau moyenne tension vis-à-vis des postes sources. Dans la carte 17 (a) (b), cette information est comparée aux résultats obtenus à partir des cellules de Voronoï, comme une première forme de validation. Malgré certaines différences, on peut considérer que la forme proposée à partir des cellules de Voronoï reste plutôt cohérente et acceptable.

En termes de précision, l'information fournie par ERDF montre qu'au milieu d'un ensemble de lignes dépendantes d'un poste peut exister une ligne dépendante d'un autre poste ; dans la partie nord de la ville en particulier, cette alternance entre ligne orange et grise n'est pas prise en compte dans la figure 17a. L'autre différence notable porte sur la zone du Vieux Port en vert foncé, associée au poste de transformation Sylvabelle. La partition de Voronoï semble

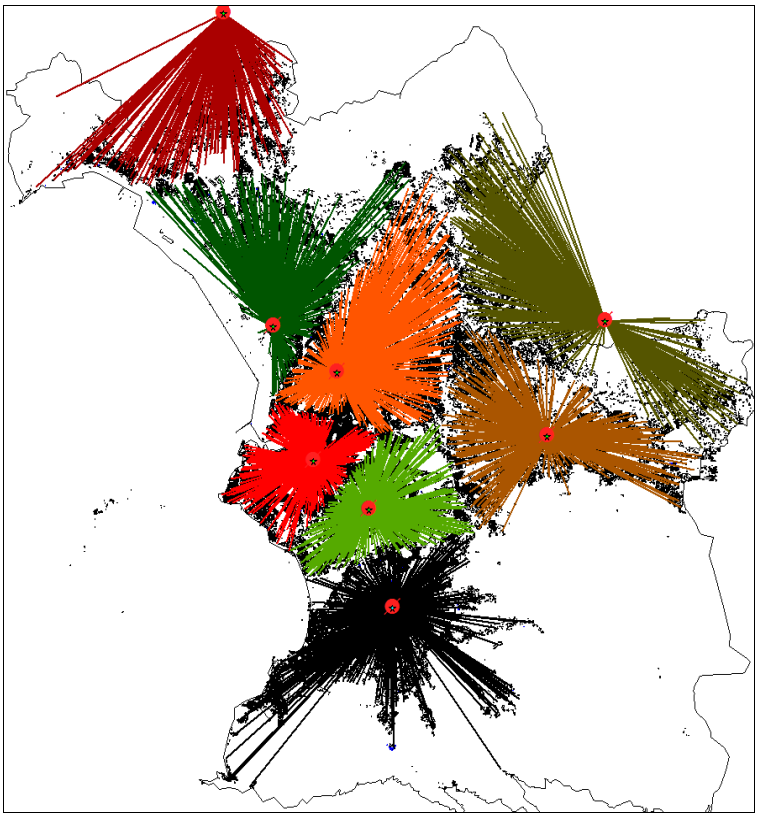
surestimer la surface de cette zone de dépendance. Cette surestimation de la zone du poste de transformation Sylvabelle est liée au fait que ce dernier est le poste de plus faible niveau de tension (63kV contre 225kV pour les sept autres) et qu'il alimente une zone très dense du tissu urbain marseillais. Nous reviendrons plus spécifiquement sur ces enjeux méthodologiques dans le chapitre 6, mais l'on comprend assez facilement qu'une technique de pondération du diagramme de Voronoï contribuerait sans doute à améliorer l'exactitude de cette structure spatiale.

Evidemment, les limites des polygones de Voronoï ne signifient pas qu'il n'existe aucun lien entre ces zones ; même si le réseau haute tension n'est pas représenté dans la carte 16 et dans les cartes suivantes, les postes sources sont bien sûr liés par ce réseau (carte 15). Toutefois, comme nous l'avons souligné plusieurs fois, nous portons ici un intérêt particulier aux relations verticales entre les composantes du réseau, et à la structure spatiale imbriquée qu'elle induit. A partir de ces postes sources, l'électricité transite par le réseau moyenne tension et alimente des postes de transformation de niveau inférieur. Alors que les postes sources d'une grande agglomération se comptent en unité et en dizaine (8 à Marseille ou 13 à Barcelone), les postes de rang inférieur se comptent aisément en centaines et en milliers (de l'ordre de 4 300 pour l'agglomération marseillaise). On retrouve alors l'idée de réseau multi-niveau, très fortement différencié et hétérogène.

Nous disposons de la localisation de l'ensemble de ces postes de niveau inférieur dans la commune marseillaise ; on considère qu'un poste est dépendant d'un poste source en fonction de son implantation dans une cellule de Voronoï associée à un poste source. Chacun des 4279 postes est ainsi associé à un des 8 postes sources (carte 18a). La structure est une représentation qui traduit l'interdépendance verticale entre deux composantes du système électrique, elle constitue le premier niveau d'imbrication dans les effets dominos des systèmes de risques et informe sur les trajectoires possibles de diffusion du système de risque en cas d'endommagement des composantes primordiales du système électrique, et donc du système technique (et donc du système territorial), que sont les postes sources. Sur la carte 18 b, on note que les limites des surfaces bâties dépassent nettement les limites tracées par le réseau ; c'est tout à fait logique puisqu'il existe encore un niveau inférieur d'organisation du réseau qui va permettre de desservir les clients résidentiels avec un niveau de tension plus adapté à leurs usages (nous ne consommons évidemment pas à notre domicile d'électricité en 20 000 volts mais en 220 volts).



(a)

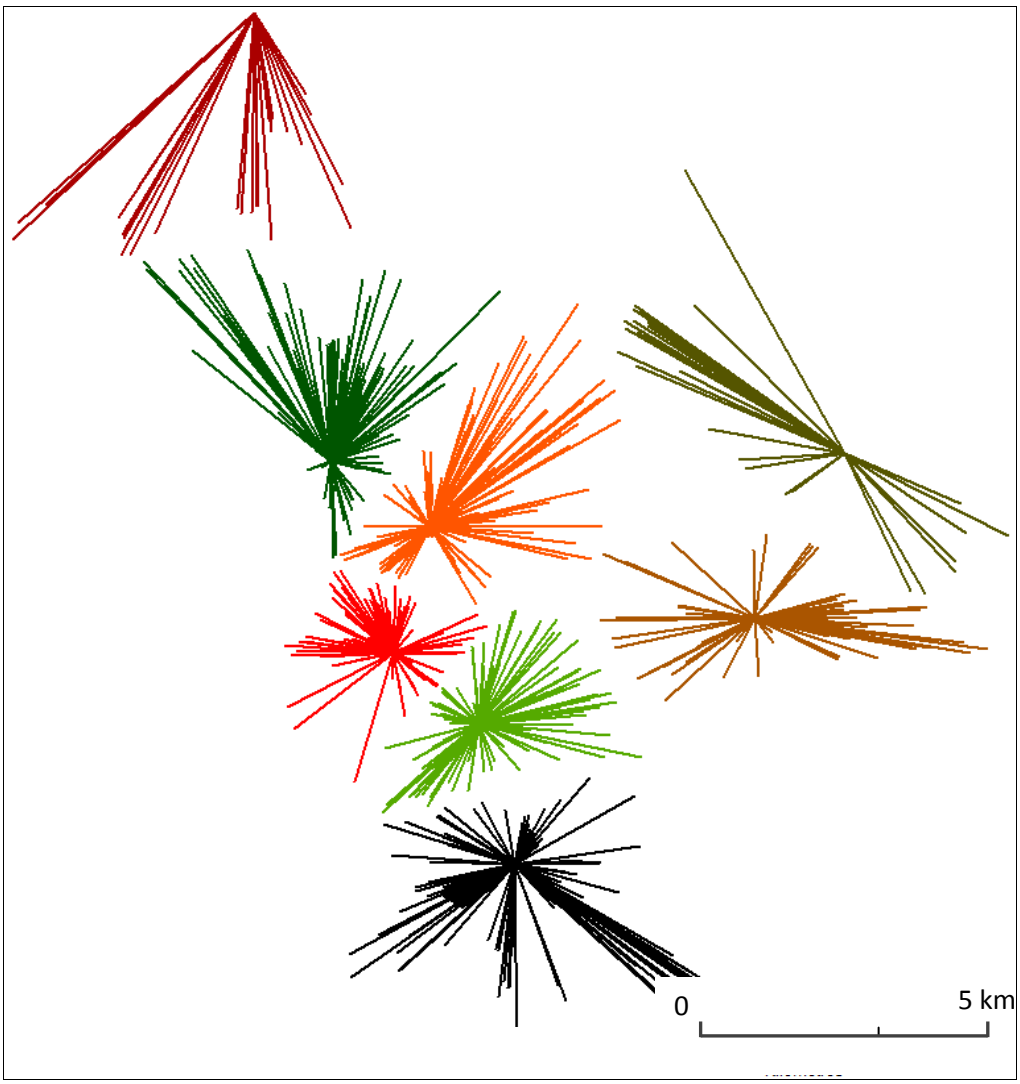


(b)

Carte 18 : (a) Ajout des nœuds des postes de niveau inférieur (relations d'appartenance de 4279 postes électriques à 8 postes source en amont) ; (b) Relations verticales de niveau 1 différenciées en fonction de l'origine du poste source, et superposition avec le tissu du bâti urbain marseillais.

Ces 4279 postes représentés de manière identique dans la carte 18 a, ne constituent pourtant pas un ensemble homogène, et il nous faut, à ce niveau, préciser l'organisation de la distribution électrique des territoires urbains. On distingue en effet trois grandes catégories de postes parmi notre ensemble de 4279 points.

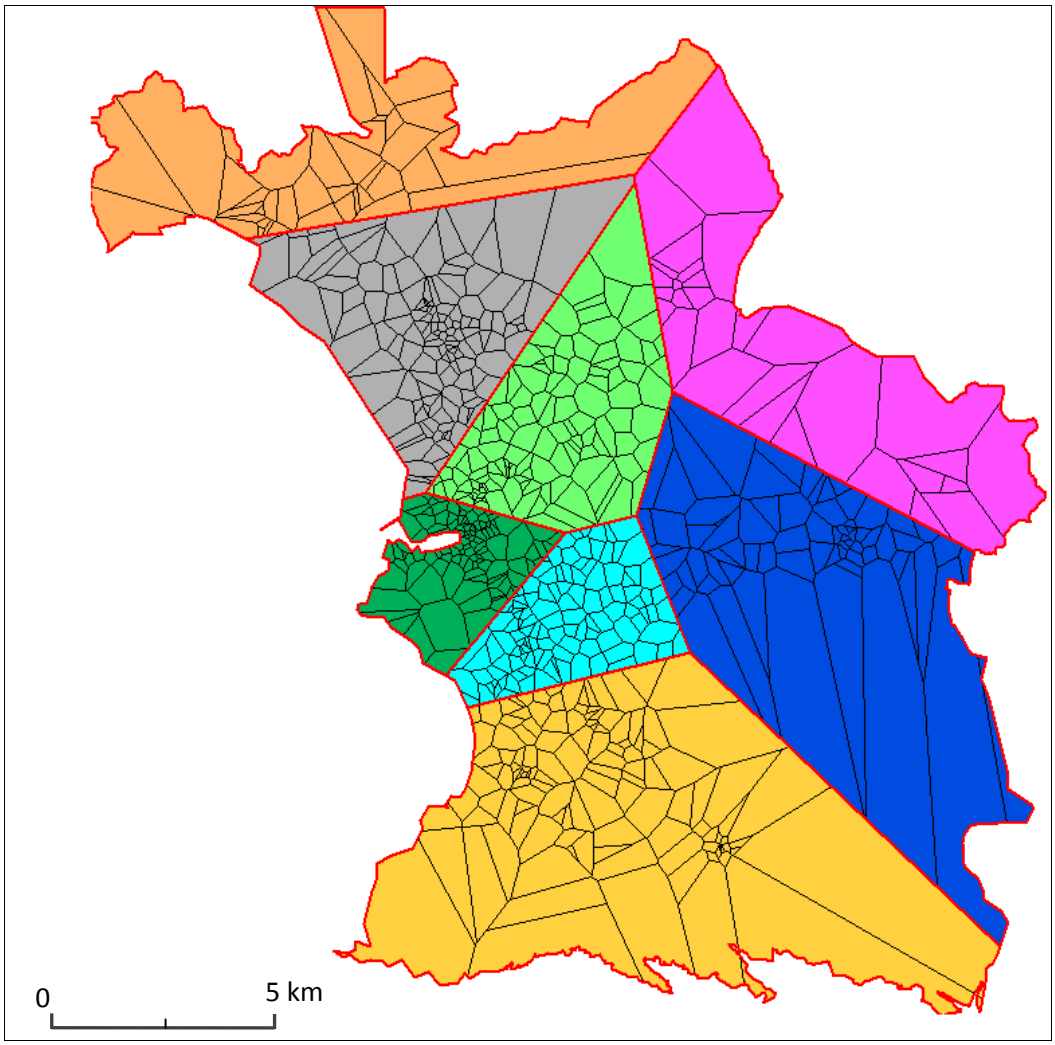
La première catégorie comprend 3359 postes, à partir desquels l'électricité va être transformée en basse tension pour ensuite desservir la consommation électrique de type résidentiel ; ce sont des postes orientés vers la distribution publique qui sont donc, en aval, connectés à plusieurs clients. La seconde catégorie comprend 712 postes, qualifiés de poste clients, ou industriels (carte 19). Ils alimentent directement en 20 000 volts un client unique. Ils concernent principalement les activités industrielles fortement consommatrices d'électricité mais aussi certaines activités commerciales, de services ou de soins. La dernière catégorie comprend 208 postes, qualifiés de postes mixtes, ils assurent à la fois la transformation pour distribuer l'énergie aux clients résidentiels, et la distribution à un client industriel. Dans les traitements suivants ces postes mixtes sont traités de manière distincte, comme deux sous-ensembles d'un même réseau.



Carte 19 : Raccordement des 712 postes clients aux 8 postes sources.

Dans la figure précédente, seules les interdépendances entre les 8 postes sources et les 712 postes clients « industriels » sont représentées ; assez logiquement le réseau est bien moins dense que dans le cas précédent où l'ensemble des liaisons était représenté. Il y a en fait plusieurs sous-réseaux, qui forment une sorte de méta-réseau puisque reliés par des liaisons à très haute tension qui ne sont pas tracées ici. Cette distinction est essentielle pour caractériser le second niveau d'imbrication spatiale induit par l'approvisionnement électrique des territoires urbains.

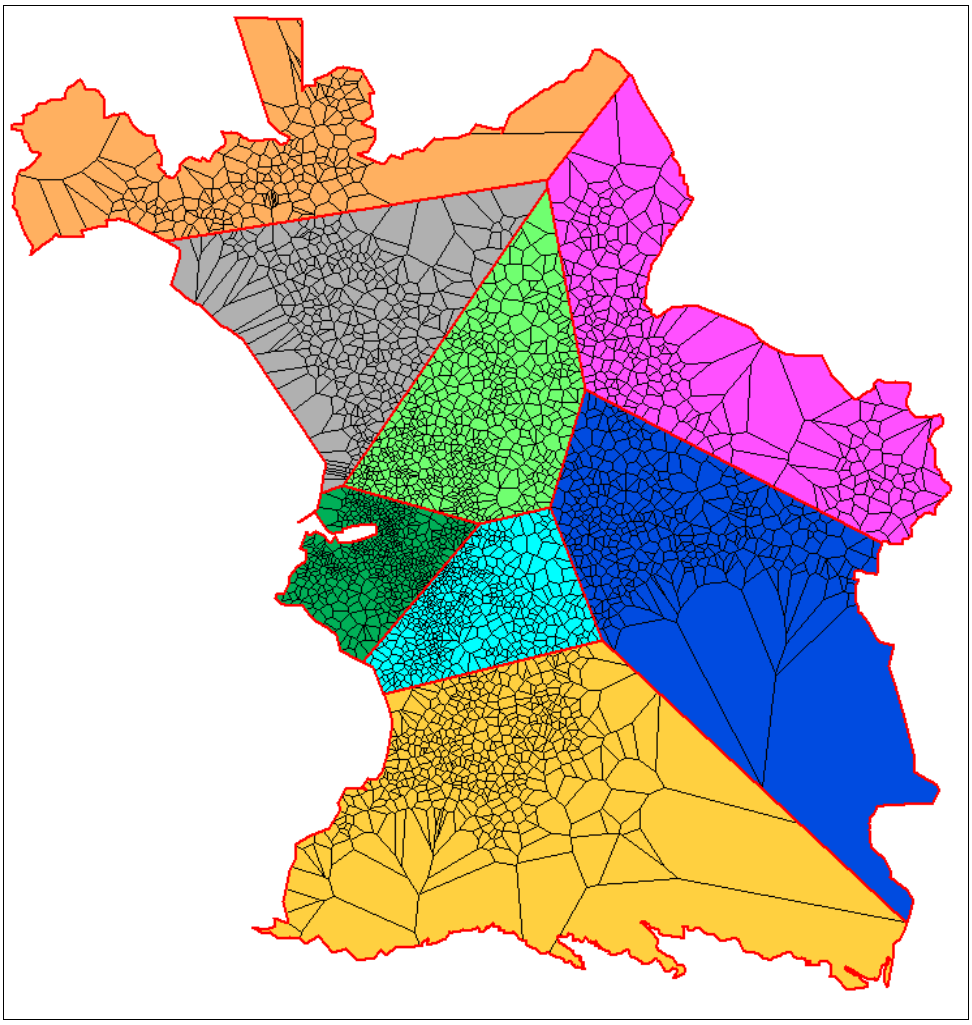
Nous choisissons donc de produire deux diagrammes de Voronoï séparés ; l'un repose sur la localisation des postes de distribution publique et des postes mixtes, il comprend 3359 + 208, soit 3567 points et autant de cellules de Voronoï (carte 21); le second repose sur la distribution des postes industriels et des postes mixtes également (puisqu'ils peuvent assumer les deux fonctions), soit 920 points (carte 20). Ces cellules de Voronoï sont contraintes par la structure des 8 cellules de niveau supérieur, c'est-à-dire qu'aucune des cellules de Voronoï n'est comprise entre deux cellules de niveau supérieur. L'appartenance à un niveau supérieur fonctionne donc de manière binaire (tout ou rien).



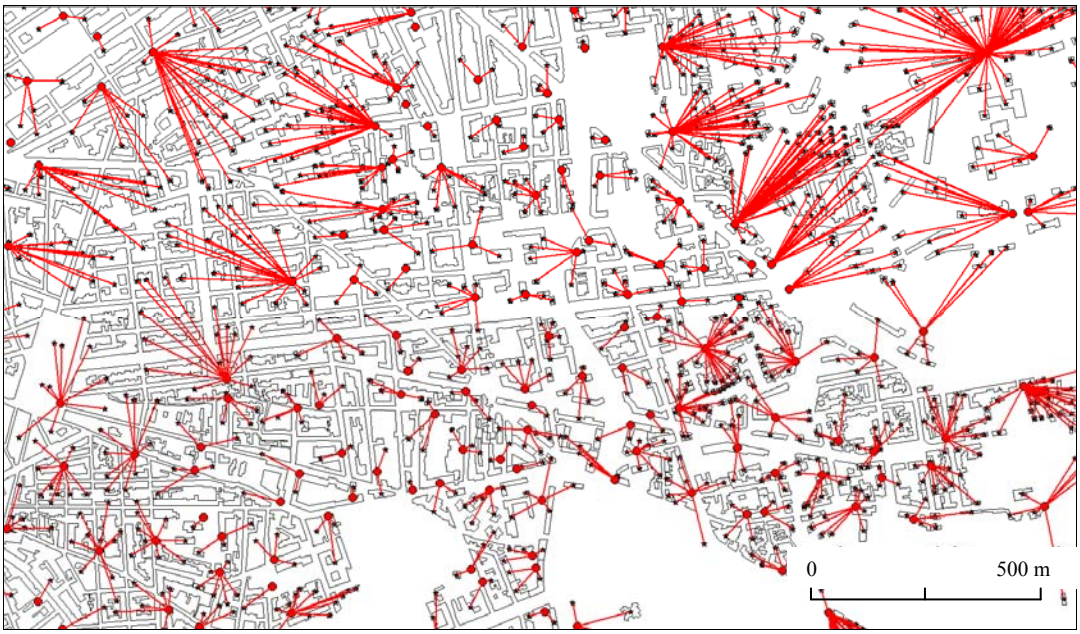
Carte 20 : Voronoï 920 sur les postes clients les postes mixtes, contraints par la structure du Voronoï de niveau supérieur.

5.1.1.2 L'approvisionnement électrique des bâtiments résidentiels par le réseau de distribution électrique, second niveau d'imbrication spatiale

Le cas de l'activité résidentielle a été le plus simple à traiter, ou plutôt a été traité le plus simplement. Les diagrammes de Voronoï de la carte 21 nous donnent les zones de dépendance supposées à chacun des postes du réseau de distribution publique, chacun des postes étant lui-même dépendant, en aval, d'un poste de niveau supérieur. Nous disposons par ailleurs, de la localisation de l'ensemble des bâtiments dédiés aux activités résidentielles (extrait de la BD Topo de l'IGN, Marseille, année). Chaque bâtiment résidentiel va ensuite être réduit à son centroïde. L'on propose alors l'hypothèse imprécise mais cohérente qu'il existe dans chaque bâtiment référencé, un point de départ de l'alimentation en électricité qui est situé au centre du bâtiment. L'on obtient alors 56 520 nœuds supplémentaires de réseaux correspondant à chaque bâtiment, qui seront attribués aux 3567 postes de distributions publiques et mixtes, en fonction de leur implantation dans les cellules de Voronoï de ces postes électriques. De manière plus ou moins indirecte, l'ensemble de ces nœuds reste lié aux 8 postes sources de départ.



Carte 21 : Diagrammes de Voronoï 3567 sur les postes de distribution publique et les postes mixtes, contraints par la structure du Voronoï de niveau supérieur.



Carte 22 : Raccordement des nœuds du réseau électrique de distribution publique aux nœuds des bâtiments résidentiels.

Chaque poste de distribution électrique peut être raccordé à un ou plusieurs nœuds de bâtiments résidentiels, ce qui est conforme à la situation observée dans la réalité. Comme on peut le voir sur la carte 22, les postes de distribution publique raccordés à des ensembles résidentiels de taille importante possèdent des nœuds « bâtiments connectés » nettement moins importants en termes de nombre et de longueur que les zones moins denses de la partie nord-ouest. Sur l'ensemble des 3 567 nœuds du réseau électrique, environ 200 ne sont attribués à aucun bâtiment résidentiel. Ils correspondent à des cellules de Voronoï dans lesquelles aucun centroïde de bâtiment résidentiel n'est implanté. Nous reviendrons sur le traitement de ces points incertains par la suite. Évidemment, l'ensemble des bâtiments résidentiels est affecté à un poste de distribution publique et il n'existe pas de bâtiments non inclus dans une cellule de Voronoï (ce qui reste tout à fait logique puisque par nature le diagramme de Voronoï permet un pavage continu de l'espace).

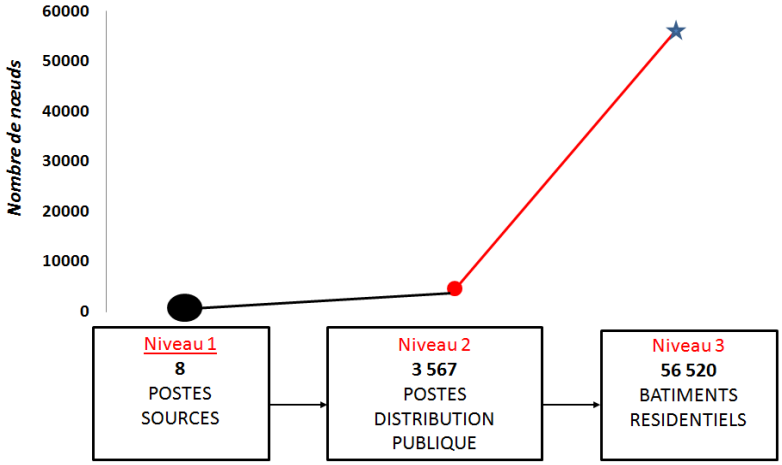
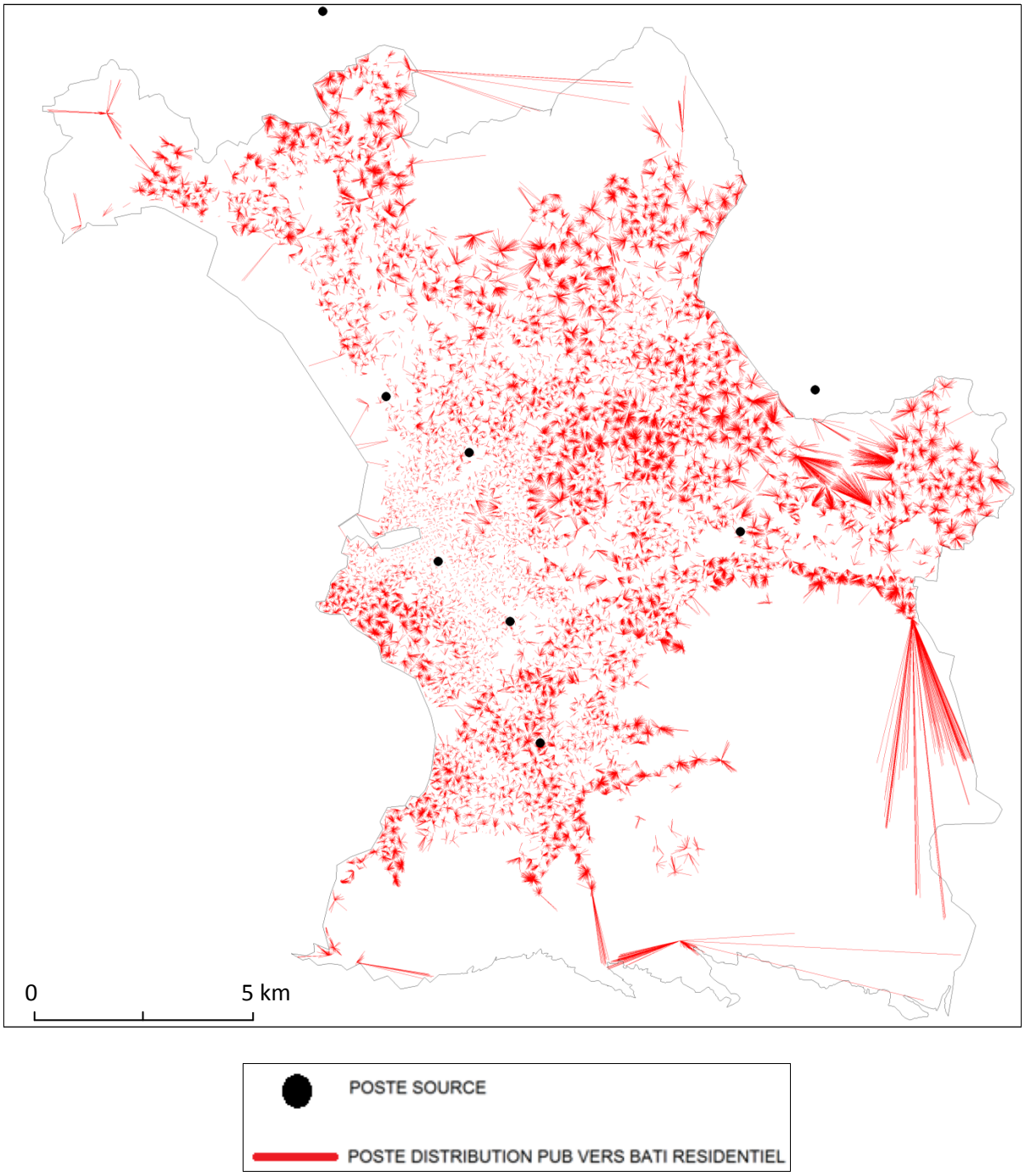
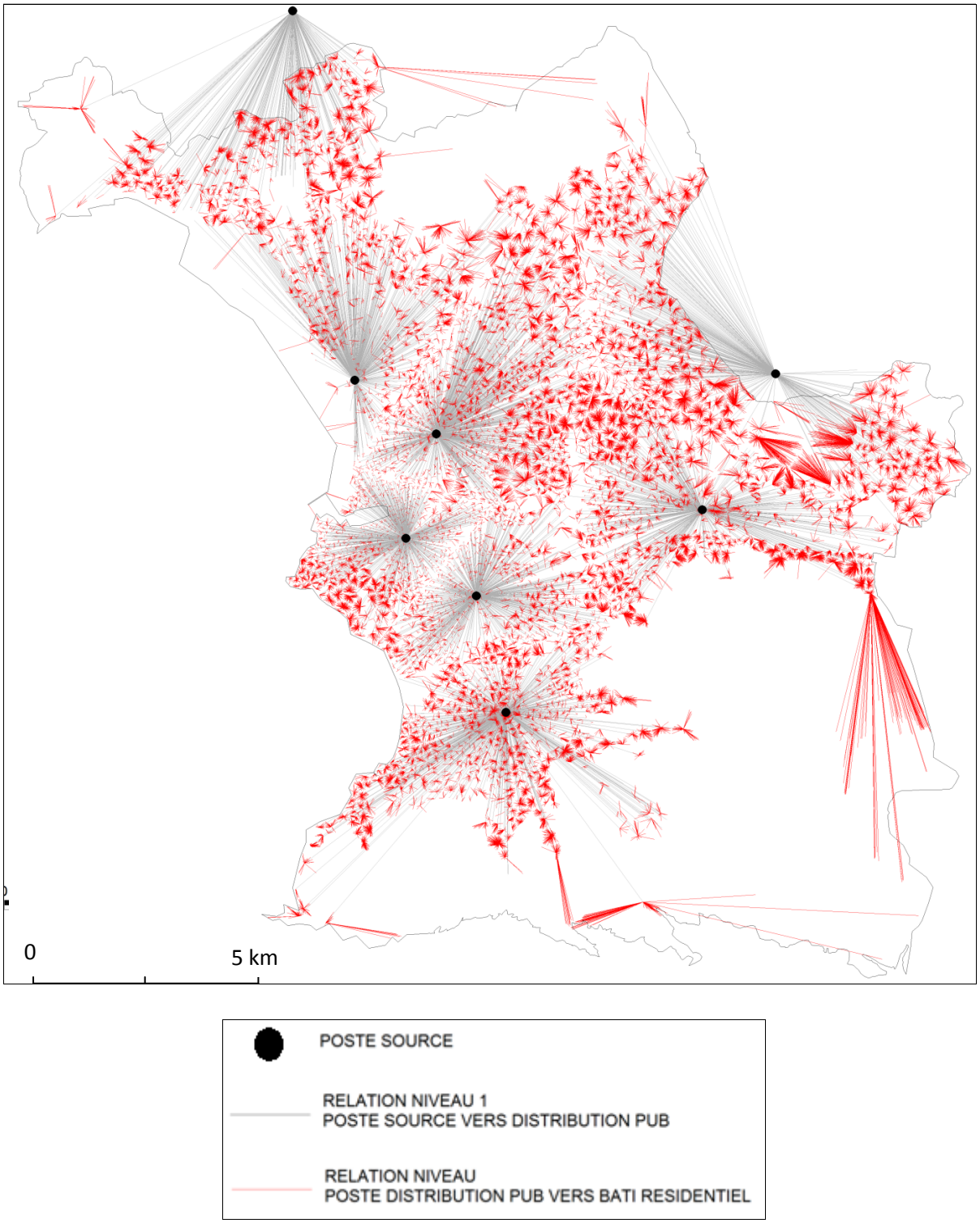


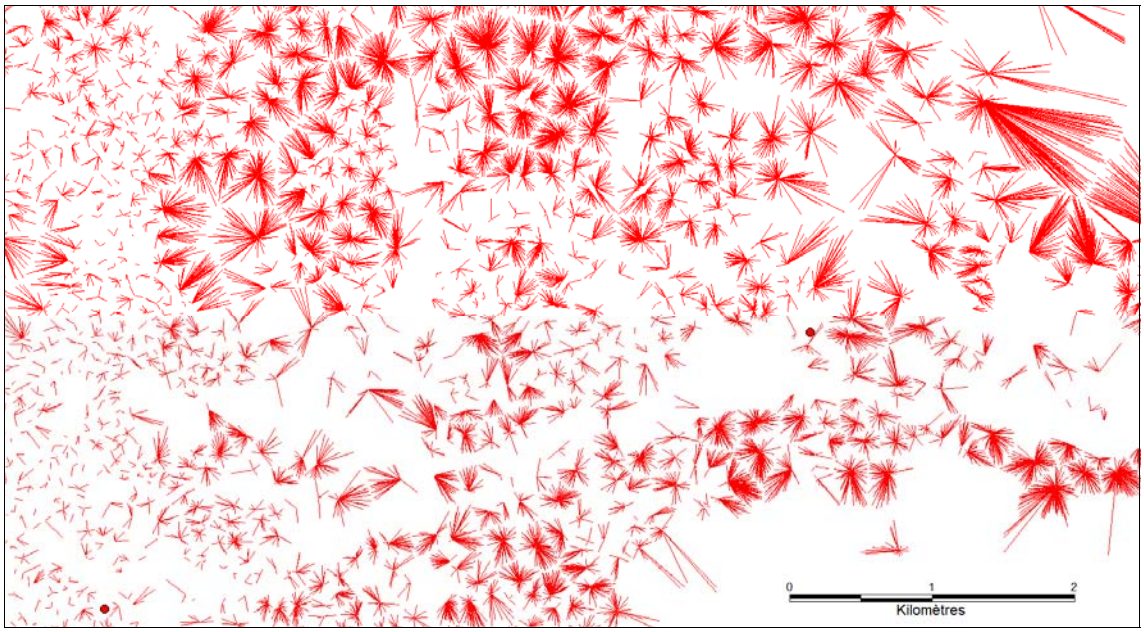
Figure 43 : Raccordement des nœuds du réseau de distribution publique aux 57 000 nœuds des bâtiments résidentiels.

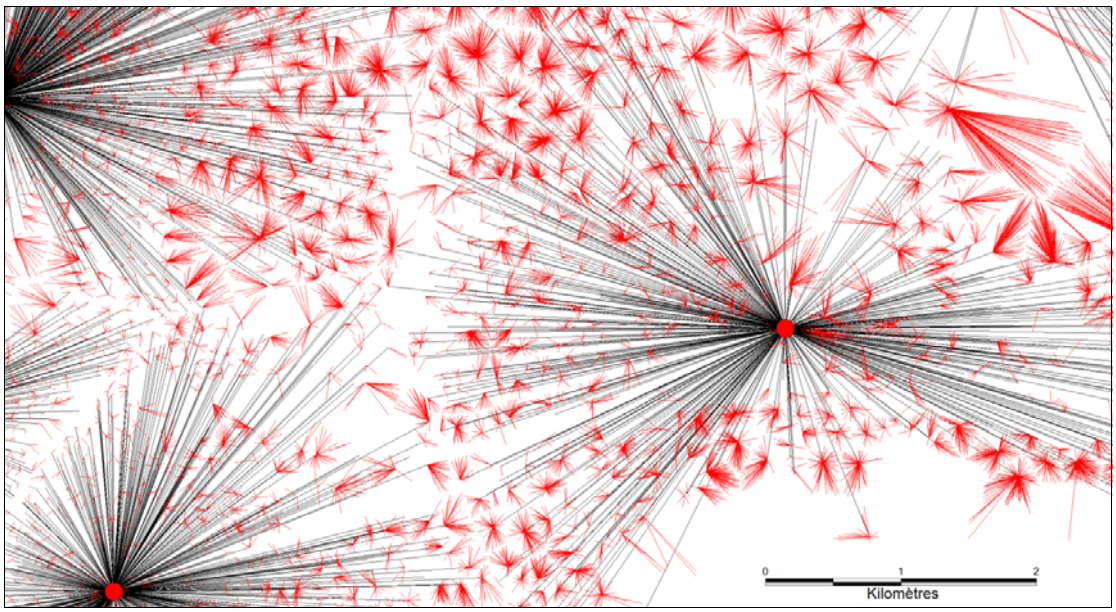


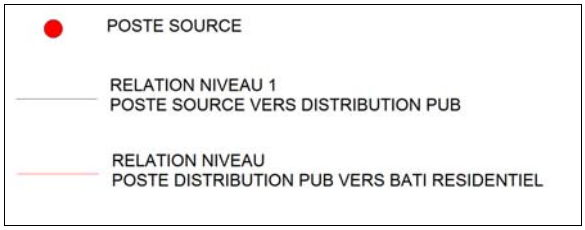
Carte 23 : Raccordement des 3567 nœuds du réseau de distribution publique aux 57 000 nœuds de bâtiments résidentiels.



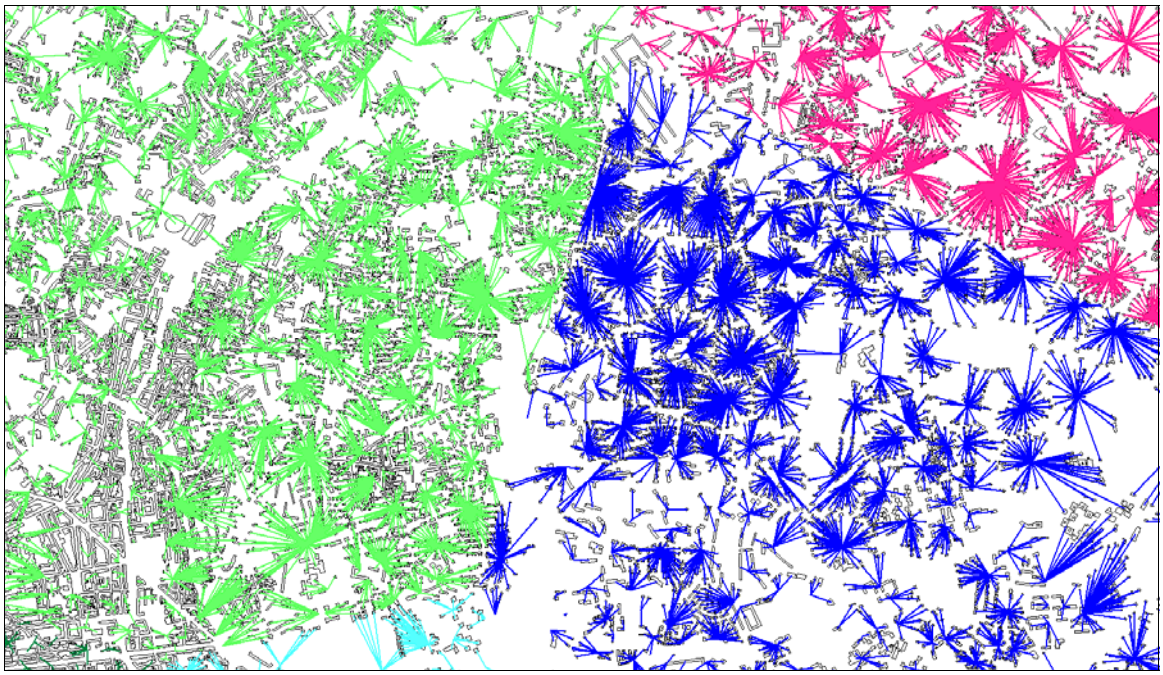
Carte 24 : Raccordement des 3567 nœuds du réseau de distribution publique aux 57 000 nœuds de bâtiments résidentiels, et raccordement des 8 postes sources aux 3567 nœuds du réseau de distribution publique.

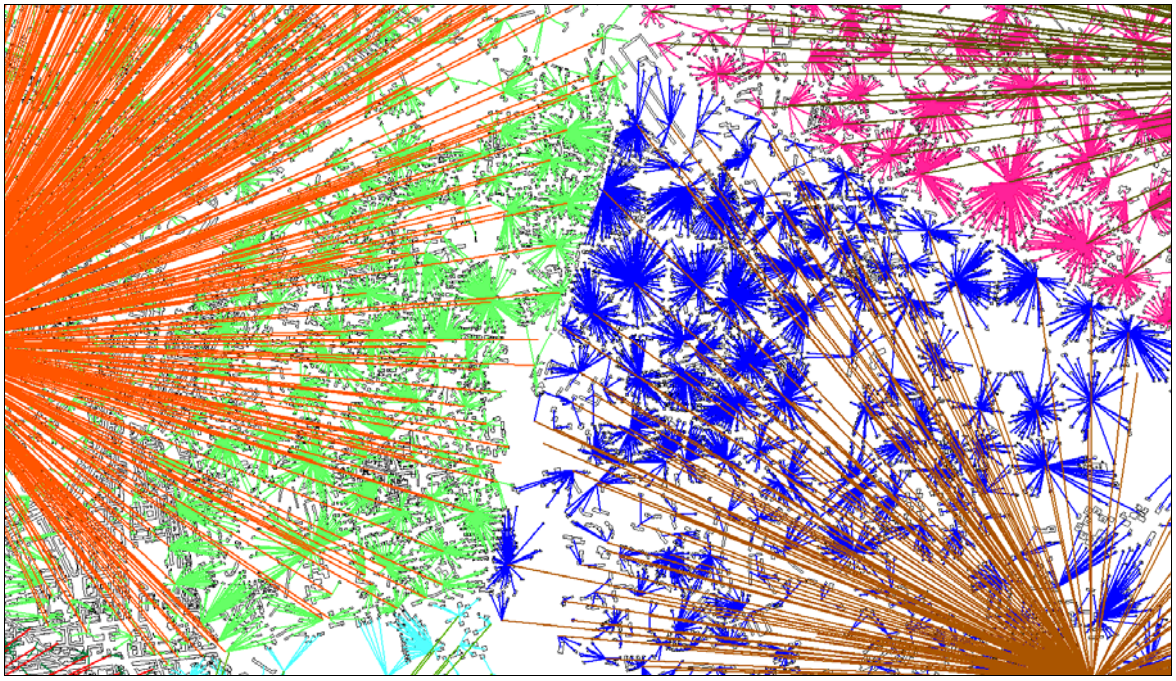






Carte 25 : Raccordement des 3567 nœuds du réseau de distribution publique aux 57 000 nœuds de bâtiments résidentiels, et raccordement des 8 postes sources aux 3567 nœuds du réseau de d distribution publique.





Carte 26: Idem que la figure précédente avec différenciation à plusieurs niveaux d'organisations des liens dont on distingue clairement l'imbrication en deux niveaux (les liaisons importantes alimentent des centres de niveau inférieur qui alimentent à leur tour des nœuds inférieurs dans la hiérarchie).

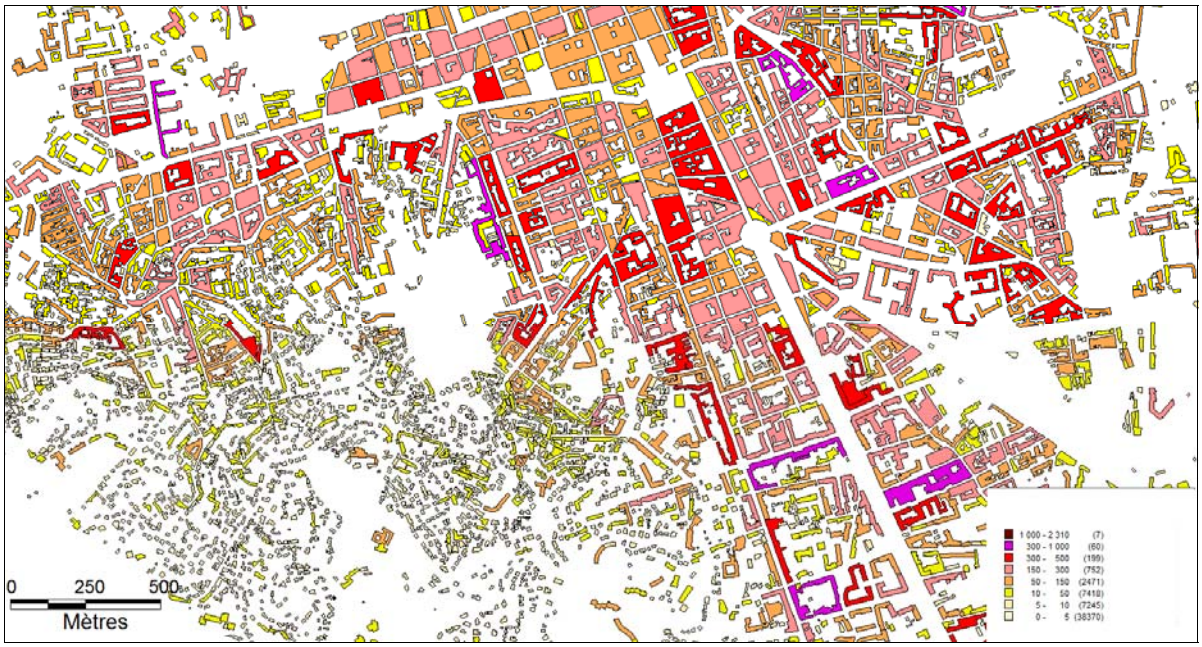
5.1.2 Dépendance électrique et détection des espaces à enjeux humains associés aux systèmes de risques

5.1.2.1 Estimation de la population résidente par bâtiments

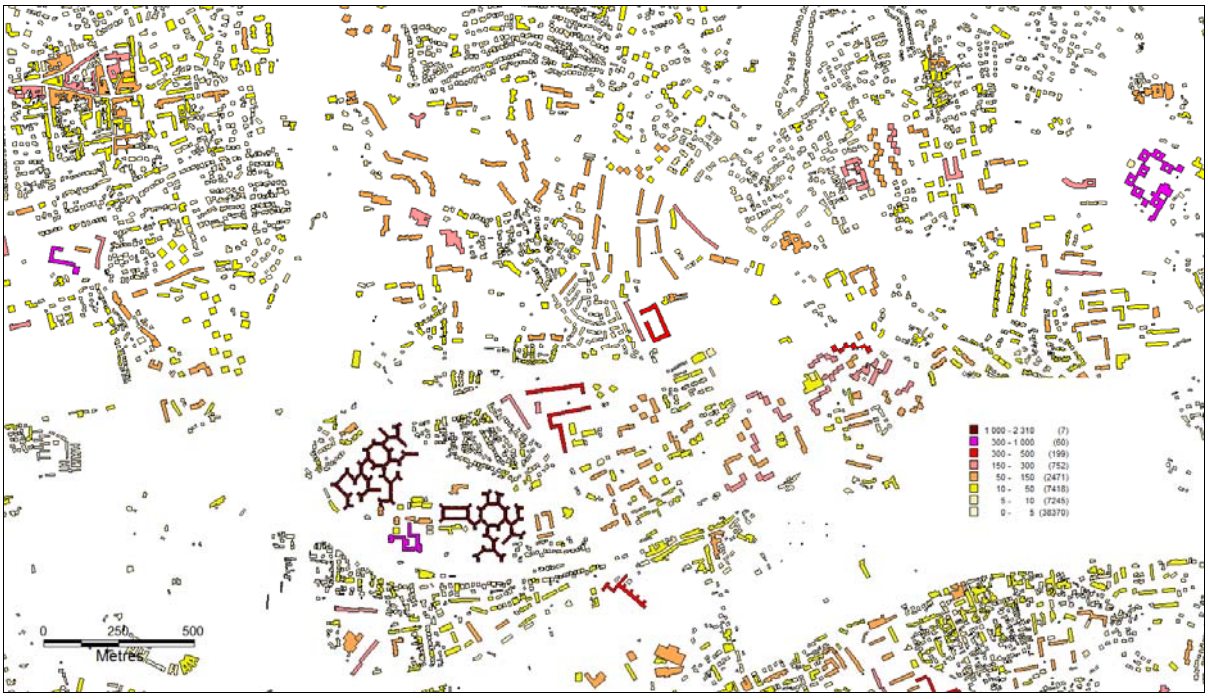
Si la méthode présentée précédemment permet d'établir l'organisation des interdépendances verticales entre un réseau électrique multi-niveau et un système spatial, elle ne nous renseigne pas directement au sujet de l'impact possible du dysfonctionnement d'un des nœuds du réseau électrique sur la stabilité du système territorial et en particulier sur la sûreté des populations. Afin de mieux qualifier le degré de dépendance sociétale associée à une composante du système technique, la première étape a été d'estimer la population résidente dans chaque bâtiment pour attribuer à chaque nœud du réseau électrique en amont, une quantité de population supposée dépendante et donc potentiellement impactée par son dysfonctionnement. Bien qu'imprécise, comme l'est toute estimation, la méthode reprend certaines étapes classiques de méthodes (CERTU, 2005, CETE, 2006) dédiées à ces questions d'estimation des populations à l'échelle des bâtiments, à partir des données de recensement démographique de l'INSEE à l'échelle des ilots, croisée à la base de données géographiques BD Topo de l'IGN. Dans notre cas, elle se décompose en quatre étapes :

1. Calcul du nombre d'étages à partir des informations sur la hauteur des bâtiments (hypothèse qu'un étage équivaut approximativement à 3 mètres, les résultats sont systématiquement arrondis, si la valeur est inférieure à 1.5 alors le résultat vaut 1 si la valeur est supérieure à 1.5 alors le nombre d'étages est 2, et idem pour les autres hauteurs).
2. Cette valeur d'étages croisée avec l'emprise au sol des bâtiments, donne une estimation de la surface habitable par bâtiment.
3. Pour chaque IRIS de la commune de Marseille, la BD Topo et le RGP 99 de l'INSEE, donnent respectivement, la surface des bâtiments dédiés à l'activité résidentielle (les autres types de bâtiments étant exclus) et la population résidente, ce qui permet de calculer la densité résidentielle par IRIS.
4. A l'échelle de chaque bâtiment, la densité d'habitants par mètre carré habitable est fonction de son IRIS d'appartenance, on peut alors en déduire une estimation du nombre d'habitants à partir des résultats des étapes 2 et 3.

Cette valeur de population résidente, calculée en tenant compte de la réalité matérielle et surfacique de la composante spatiale « Bâtiment résidentiel » et de la densité résidentielle par IRIS, est ensuite rattachée aux objets ponctuels (centroïde) associés à chacun de ces bâtiments et donc aux réseaux d'interdépendances verticales identifiés dans la sous-partie sur la criticité. Il est alors possible d'associer à chaque nœud du réseau électrique, quel que soit son niveau dans l'organisation imbriquée, une valeur de population résidente, dépendante, de manière directe ou indirecte en fonction de la population, d'un ou plusieurs bâtiments publics, et associée à un nœud de distribution publique, lui-même associé à un nœud de poste source. Les résultats portés sur les cartes 27 et 28 donnent une estimation du nombre de résidents à l'échelle de chaque bâtiment.



Carte 27 : Attribution des populations résidentes aux bâtiments résidentiels. (zone centre Marseille, Prado).



Carte 28 : Attribution des populations résidentes aux bâtiments résidentiels (zone périphérique).

La représentation sous forme choroplète d'informations brutes dans les cartes précédentes, ne répond pas aux règles de sémiologie graphique, mais a, ici, pour objectif de mettre en avant une certaine cohérence des résultats au vu de la forme des bâtis résidentiels. Sur la carte 27, le nombre important de bâtiments fortement peuplés dans les zones centres tranche avec les zones d'habitat plus dispersé de la partie sud-ouest ; dans la partie sud-ouest de la carte 28, il est à remarquer également, de grands ensembles d'habitation collective avec une forme très

géométrique, qui correspondent d'ailleurs à un des rares ensembles de bâtiments résidentiels (7 au total) dont on estime que la population résidente dépasse le nombre de 1 000 habitants. Sur les deux cartes, sont représentés exclusivement les bâtiments dédiés aux activités résidentielles, selon la classification de la BD Topo ; n'apparaissent donc pas les bâtiments industriels, et commerciaux, ni les bâtiments dits « remarquables » (principalement les lieux de cultes, les enceintes sportives et les bâtiments administratifs).

5.1.2.2. La dépendance électrique, les populations vulnérables et les trajectoires à enjeux des systèmes de risques

Dans la sous-partie précédente, nous avons considéré la population résidente de manière strictement homogène. Néanmoins, il est tout à fait envisageable de mener cette estimation de la population par bâti, en différenciant l'ensemble population (à l'échelle des IRIS ou des îlots), en plusieurs sous-ensembles de populations, d'âge différencié par exemple. Ainsi, il est possible d'en déduire, à l'échelle de chaque poste électrique, par exemple, un nombre supposé de personnes de moins de 3 ans ou de plus de 85 ans, rattaché à chacun des nœuds du réseau électrique. La question de la dépendance électrique des populations peut également être prise en compte d'une manière beaucoup plus ciblée, en s'attachant par exemple à identifier des « chemins » par lesquels pourraient être impactés des bâtiments dont on sait qu'ils accueillent un grand nombre de populations fragiles, et pour lesquels la coupure électrique peut induire des situations de risques vitaux beaucoup plus rapidement et couramment que dans les autres types de bâtiments. Les maisons de retraites ou encore les hôpitaux ont été ici considérés, mais il serait envisageable d'intégrer à l'analyse d'autres bâtiments, les crèches par exemple.

En pratique, les hôpitaux et certaines maisons de retraite sont considérés par ERDF comme des clients dits prioritaires, ainsi lors des délestages volontaires, la ligne associée à leur alimentation ne peut pas être coupée. En revanche, dans le cadre d'une panne consécutive à des endommagements physiques (comme l'ennoiement de postes électriques), ou à l'écroulement total d'un réseau électrique, les gestionnaires ne disposent plus intégralement de cette capacité de contrôle ; il est alors possible que l'alimentation d'un client prioritaire soit rompue. Nous citerons, à titre d'exemples, le cas de l'Hôpital Saint Antoine, à Paris, où, en raison de coupures électriques survenues le jeudi 26 juin 2008, sans évènement déclencheur majeur, l'une des deux lignes 20 kV assurant l'alimentation a été rompue, malheureusement, « le groupe électrogène de secours (de l'Hôpital) n'était pas assez puissant pour prendre en totalité la charge électrique d'un câble défaillant » (ERDF) ; ou encore, les cas de l'Hôpital Pourtalès de Neuchâtel, le 5 novembre 2006, et de l'Hôpital Edouard Herriot, de Lyon, le 26 septembre 1998, où un incident ponctuel sur une ligne du réseau de distribution en amont de l'hôpital a généré une coupure électrique dans une partie ou dans l'intégralité de l'établissement.

Pour Marseille, ERDF n'a pas été en mesure de nous communiquer d'informations précises sur les coupures électriques observées dans le passé à l'échelle de la commune. Nos recherches dans la presse récente, ont relevé une panne électrique de quelques secondes, en janvier 2007, à l'Hôpital de la Timone. La très faible durée de la coupure, contrairement aux

cas précédents, s'explique par le bon fonctionnement du système de secours de l'approvisionnement électrique. La cause de cette coupure reste incertaine mais semble due, d'après la presse et les gestionnaires électriques, à une « tentative de vol de câbles électriques » (en cuivre), liés à l'alimentation de l'hôpital.

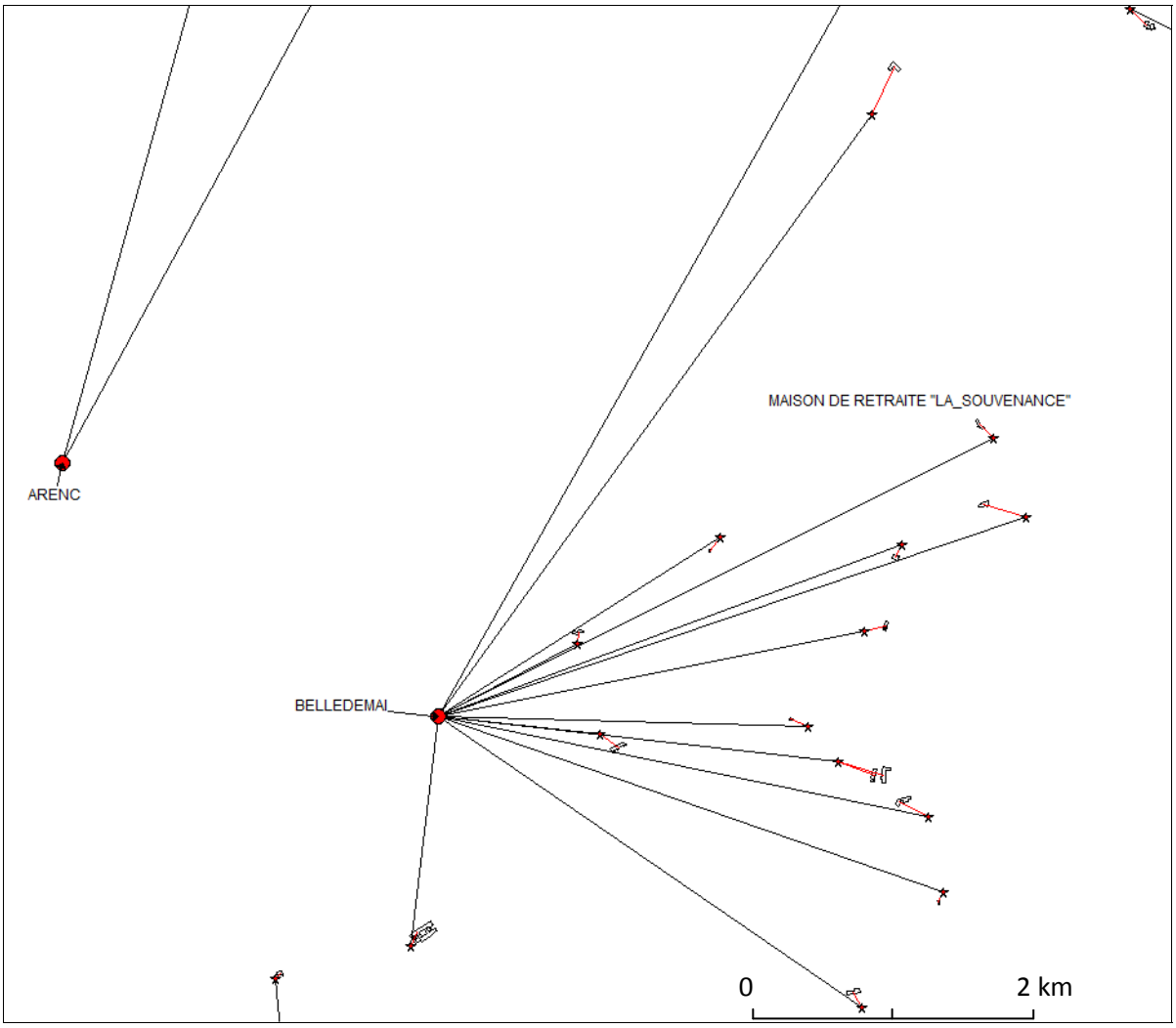
Par ailleurs, la presse fait assez régulièrement état de coupures électriques dans les quartiers du VIIIème arrondissement, au sud de la ville, dans les quartiers du Prado, et de Pointe Rouge en particulier. Ces coupures, qui concernent généralement entre 1 000 et 5 000 clients, peuvent être liées à des défaillances du réseau moyenne tension. Tel est le cas de la coupure du 20 juillet 2008 survenue dans le secteur du Prado, et qui se démarque à double titre, d'une part, en raison de sa durée, avec 3000 clients coupés pendant près de 24 heures, du fait de l'endommagement d'une ligne 20 kV au départ du poste source de Rabatau et d'autre part, par le fait qu'elle a été suivie d'une nouvelle panne, deux jours plus tard, ce qui a été, d'après les témoignages, assez mal vécu par les habitants de ces quartiers ; certains se sont plaints, dans la presse locale, d'« avoir dû jeter deux fois en trois jours le contenu de leur congélateur ».

La coupure électrique du 23 août 2012 impacte à nouveau cet arrondissement de Marseille mais dans les quartiers de Pointe Rouge et des Goudes ; au cours de cette nouvelle coupure, « chose rarissime : dans un premier temps, le générateur principal est tombé en panne. Dans une seconde phase, celui de secours mis en route, s'est à son tour arrêté. » (Journal La Provence). Même si pour chaque évènement, des circonstances et des défaillances qualifiées de « rarissimes » apparaissent, il semble pourtant qu'il existe bien dans certaines zones de la ville, une récurrence des coupures électriques.

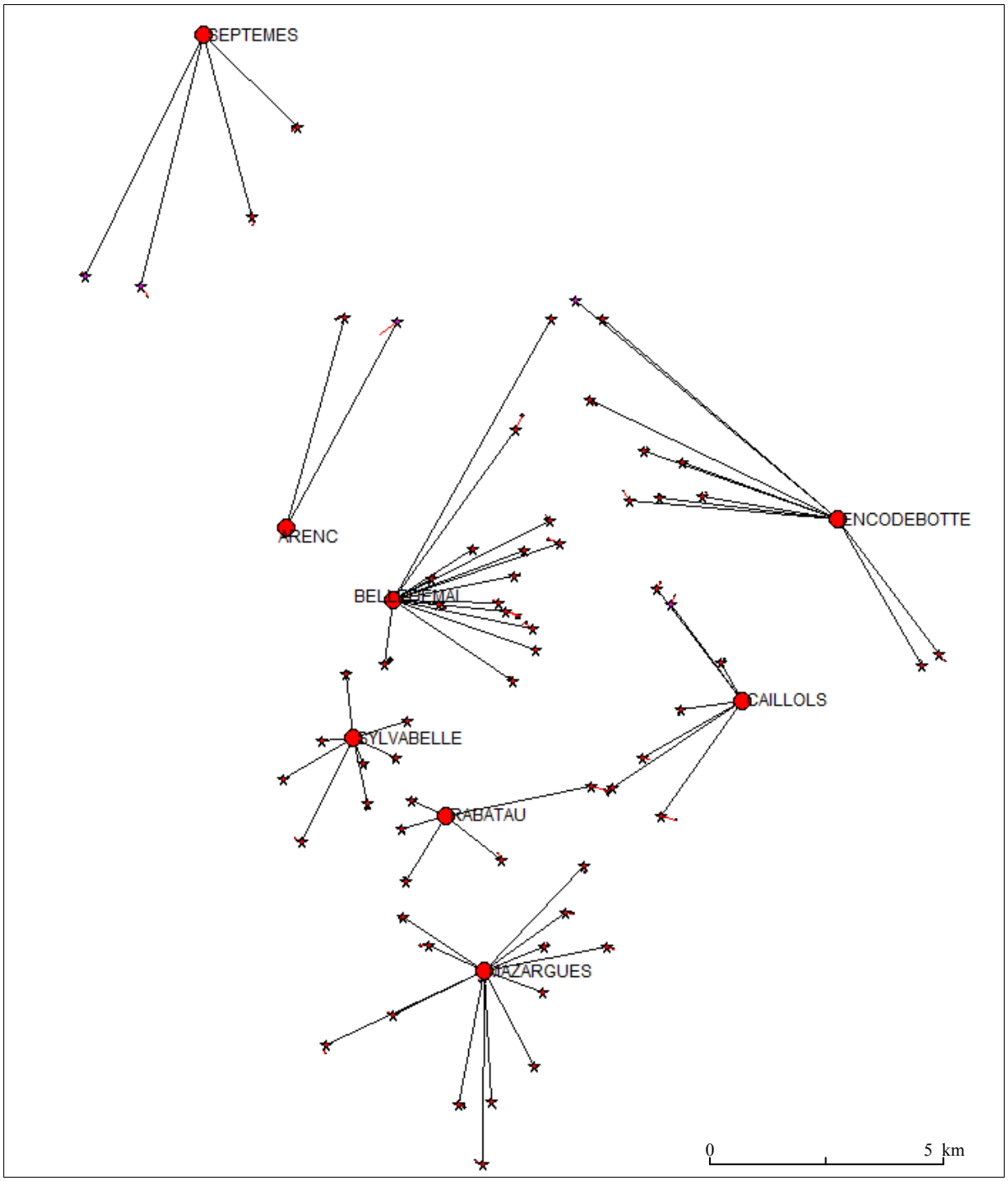
La création des bases de données géographiques sur les hôpitaux et les maisons de retraite est réalisée à partir de recensements et de sources diverses, Mairie de Marseille, annuaire sanitaire et social des EHPAD (Etablissement d'Hébergement pour Personnes Agées et Dépendantes), complété par des recherches internet et téléphoniques pour localiser certaines maisons de retraite. La précision spatiale des données est forte puisqu'à partir de l'information sur l'adresse de chacun de ces établissements, les maisons de retraite et les hôpitaux sont rattachés directement à l'échelle des bâtiments de la BD Topo. Un hôpital comprend fréquemment plusieurs bâtiments alors que les maisons de retraite sont généralement rattachées à un bâtiment unique. Pour chaque bâtiment, on considère également des informations quantitatives sur les capacités d'accueil de la maison de retraite et le nombre de lits disponibles dans l'hôpital.

Dans le cas des maisons de retraite, l'alimentation électrique des 67 bâtiments identifiés (plus de 5 600 places d'accueil) s'appuie sur le réseau électrique de distribution publique, on considère alors la localisation des centroïdes de ces bâtiments en prenant le pavage de Voronoï en 3 567 cellules (carte 21) comme périmètre d'appartenance de référence.
Les maisons de retraite sont alors raccordées aux réseaux d'interdépendance et il est envisageable de connaître pour chacune de ces maisons de retraite, le poste de dépendance à l'échelle des niveaux 1 et 2 de l'organisation du réseau électrique (carte 29 et 30). De même, il est possible à l'échelle de chaque poste électrique, de détecter la présence de composantes territoriales dont on suppose qu'elles possèdent une forme de fragilité particulière et de

dépendance électrique accrue. La détection des trajectoires permettant d'affecter ces cibles fragiles permet alors d'envisager leurs risques indirects ; par exemple, une maison de retraite peut se situer nettement en dehors d'un périmètre inondable, tout en étant dépendante d'une ou deux composantes qui sont en revanche comprises dans ce périmètre ; de fait, la maison de retraite ne fait pas partie du périmètre de risque inondation, mais fait pleinement partie du système spatial associé au système de risque inondation.

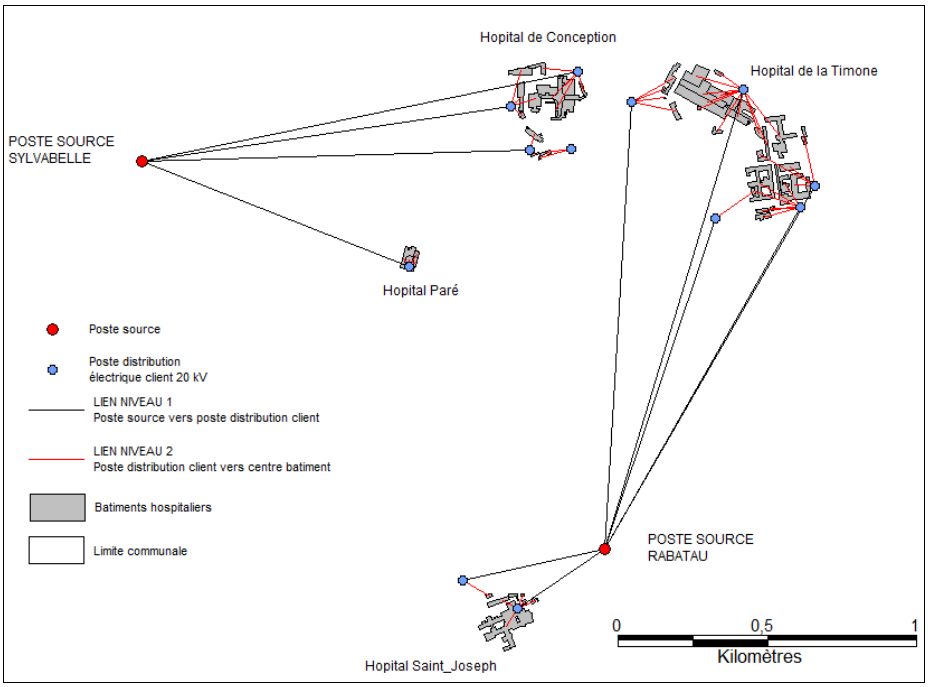


Carte 29: Les interdépendances entre le poste source Belle de Mai, 14 nœuds du réseau de distribution publique et 15 maisons de retraite.

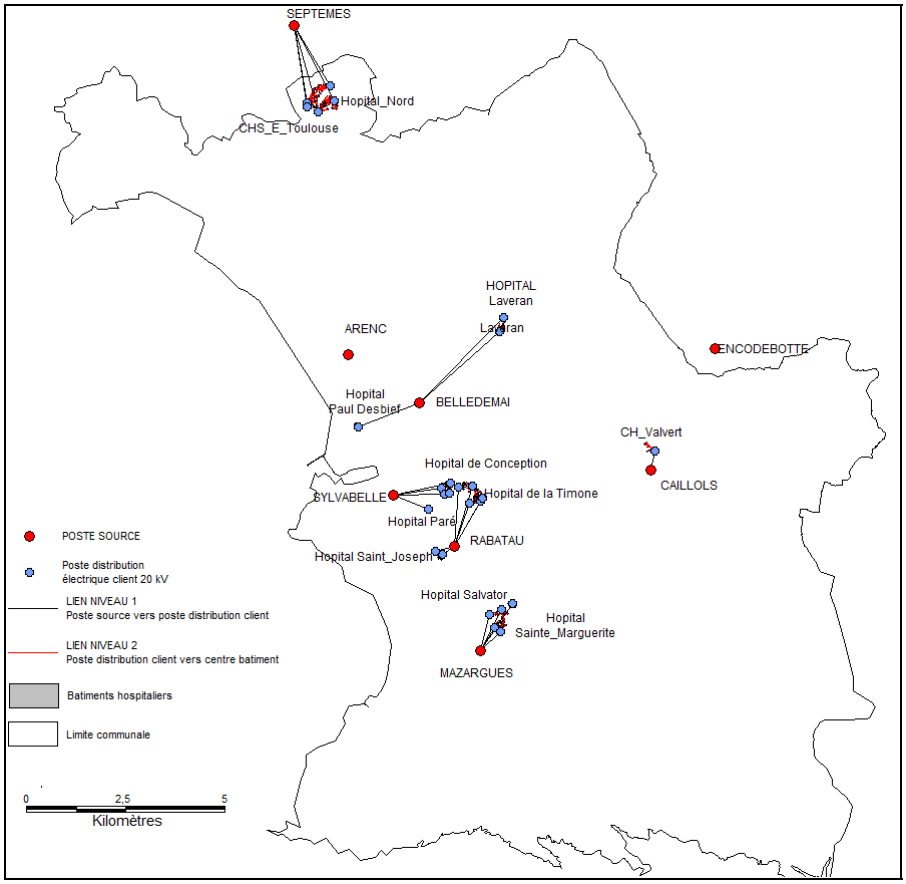


Carte 30 : Les interdépendances entre les 8 postes sources, les 62 postes de distribution publique et les 67 maisons de retraite à l'échelle de la ville de Marseille.

Dans le cas des hôpitaux (carte 31 et 32), étant donné que l'alimentation électrique s'appuie sur le réseau moyenne tension, les bâtiments sont raccordés en fonction de leur appartenance aux 920 cellules de Voronoï, associées aux 708 postes clients industriels et 212 postes mixtes. Certains hôpitaux de taille importante, comme l'Hôpital de la Timone de la carte 31, qui comptent plusieurs bâtiments, peuvent être reliés à plusieurs postes clients, tout comme un même poste client peut alimenter plusieurs bâtiments d'un même hôpital.



Carte 31 : Les interdépendances entre les postes sources de Rabatau et de Sylvabelle, les postes clients 20 kV et les hôpitaux Saint Joseph, de la Timone, de la Conception et Paré.



Carte 32: Les liaisons entre les postes électriques et les hôpitaux, trajectoires à enjeux de dépendance des systèmes de risques.

5.1.3 Les enjeux économiques associés aux systèmes de risques de coupures électriques et la prise en compte de l'incertitude et de l'imprécision dans l'estimation des interdépendances réseaux territoires.

5.1.3.1 Raccordement des postes clients et mixtes aux bâtiments d'activités

L'affectation des postes de distribution publique aux activités résidentielles, telle que présentée dans les cartes de la sous-partie précédente, laisse penser à une connaissance parfaite et certaine des interdépendances des réseaux électriques et des zones de consommation qui ne reflète pas réellement la situation d'imprécision et d'incertitude décrite dans le chapitre 3. Il est donc important de préciser que ces interdépendances demeurent des possibilités et non des certitudes. De plus, nous avons souligné qu'une minorité (- de 10%) des postes de distribution publique demeurait sans affectation, sans préciser pour l'instant comment nous envisagions le traitement de ces postes non attribués. Nous présenterons le traitement de ces postes non attribués et incertains en nous appuyant sur le cas des postes clients et des postes mixtes.

Pour cette catégorie de postes, nous considérons qu'il n'existe normalement qu'un seul client rattaché au poste. On dispose donc de 920 nœuds électriques (712 postes clients et 208 postes mixtes) qui doivent être rattachés à un nombre équivalent de bâtiments. Les clients rattachés à ces postes ont un besoin particulièrement important en électricité et ne sont pas à rechercher parmi les bâtiments résidentiels. Pour identifier les bâtiments possiblement connectés à ces postes électriques, nous nous appuyons sur la classification des bâtiments proposée dans la BD Topo et retenons :

- les bâtiments commerciaux extraits de la BD Topo,
- trois types de bâtiments classés dans la catégorie des bâtiments remarquables, les bâtiments administratifs de type mairie et préfecture, et les 20 plus grands bâtiments sportifs,
- les bâtiments industriels de taille supérieure à 10 000 m² de surface aménageable extraits de la BD Topo (en tenant compte du nombre d'étages avec une hypothèse de 3 mètres par étage),
- les bâtiments hospitaliers tels que décrits précédemment.

En considérant ces types de bâtiments, nous disposons d'environ 1 000 bâtiments qui sont potentiellement raccordés à notre catégorie de postes électriques. En réalité, ces 1 000 bâtiments ne sont pas nécessairement tous raccordés à ce type de postes ; et il est certain que certains types de bâtis supplémentaires pourraient être envisagés comme « raccordables » au réseau électrique. Il y a donc plus d'incertitude que dans le cas de la distribution publique car il existe une méconnaissance non seulement de la localisation mais aussi du type de bâtiments connectés à ces postes.

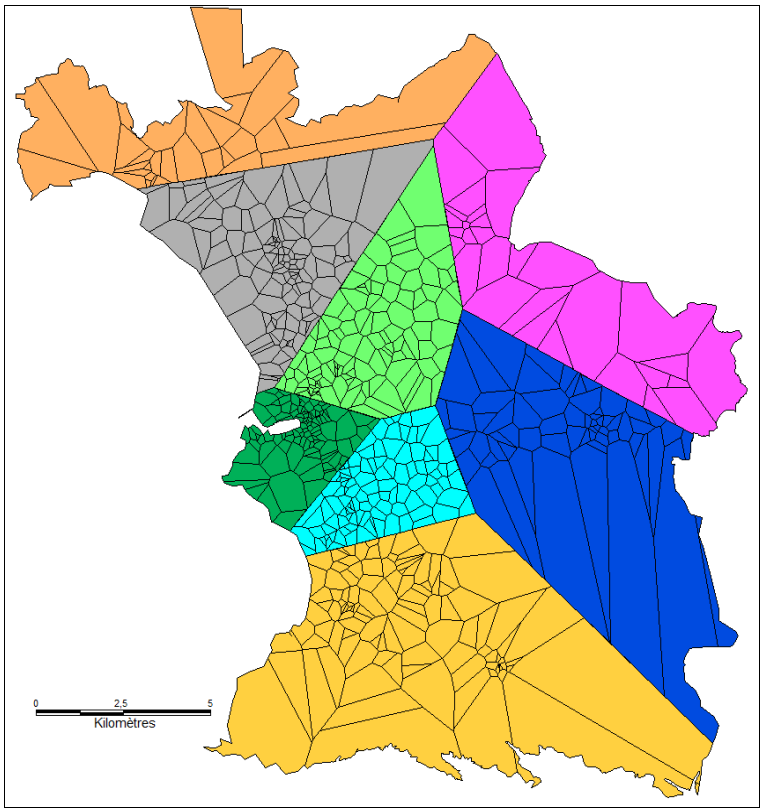
Néanmoins, la méthode repose sur l'hypothèse plausible de l'ensemble des clients raccordés et sur une solution méthodologiquement raisonnable pour pallier l'absence de données exhaustives sur la localisation des clients industriels (la mise à disposition de cette donnée peut poser des problèmes puisqu'il s'agit en fait de transmettre des informations sur une

relation contractuelle entre la distribution électrique et une liste de clients qui peuvent considérer que la nature de leurs relations contractuelles avec le distributeur électrique est « confidentielle ».

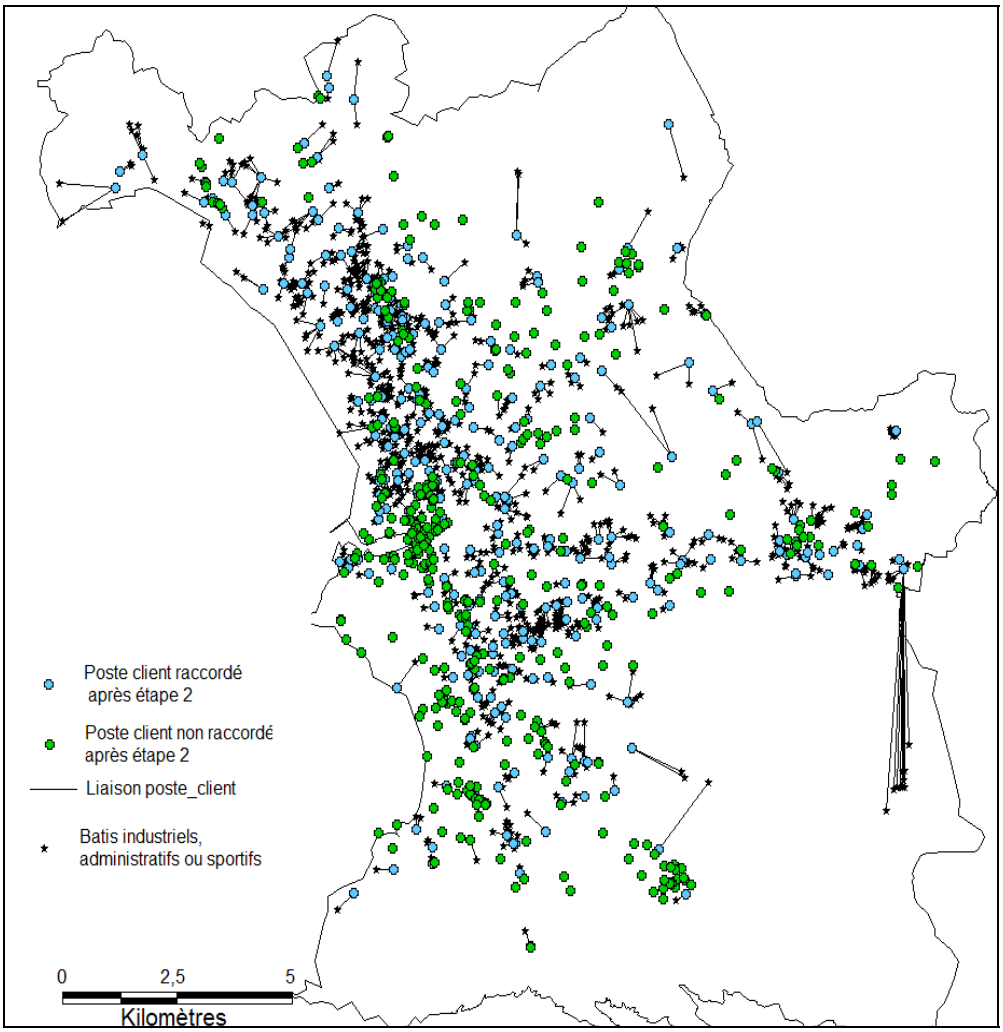
A partir du pavage de Voronoï en 920 cellules (carte 20), auquel on va superposer la localisation de l'ensemble des centroïdes de bâtiments d'hôpitaux, on considère que l'appartenance d'un des centroïdes à une cellule de Voronoï, implique que ce bâtiment hospitalier est dépendant du poste électrique associé à la cellule du Voronoï. Ces postes sont donc retirés. Ensuite, la méthode est appliquée aux centres commerciaux, puis aux bâtiments remarquables et enfin aux bâtiments industriels. L'ensemble des hôpitaux et des centres commerciaux est ainsi connecté à un poste client, alors qu'assez peu de bâtiments industriels sont raccordés. Dans l'autre sens, nous parvenons à attribuer des bâtiments de desserte à seulement 104 postes électriques. 816 postes électriques demeurent donc sans affectation.

5.1.3.2 Prise en compte de l'incertitude spatiale et raccordement par itération

Nous choisissons donc de réaliser une nouvelle partition de Voronoï à partir de ces 816 postes restants, en imbriquant ces polygones à l'intérieur des 8 polygones initiaux des postes sources, puis de tester à nouveau l'appartenance des centroïdes des bâtiments non affectés à ces nouvelles cellules (de taille légèrement plus importante puisque le nombre de points a légèrement diminué).



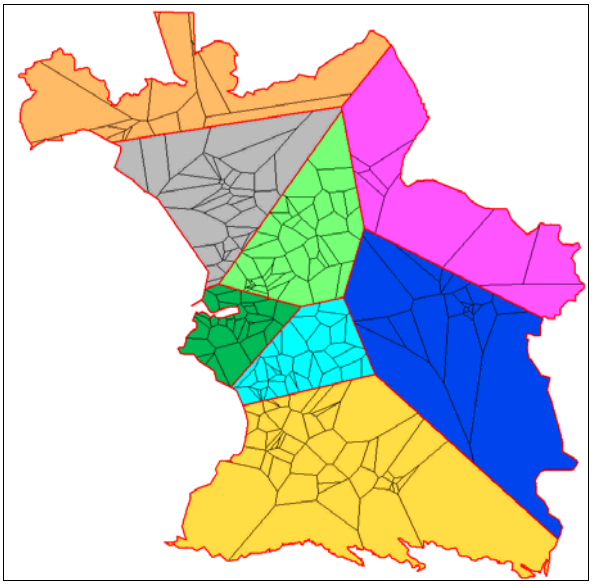
Carte 33 : Partitions de Voronoï imbriquées à partir des 816 postes restants.



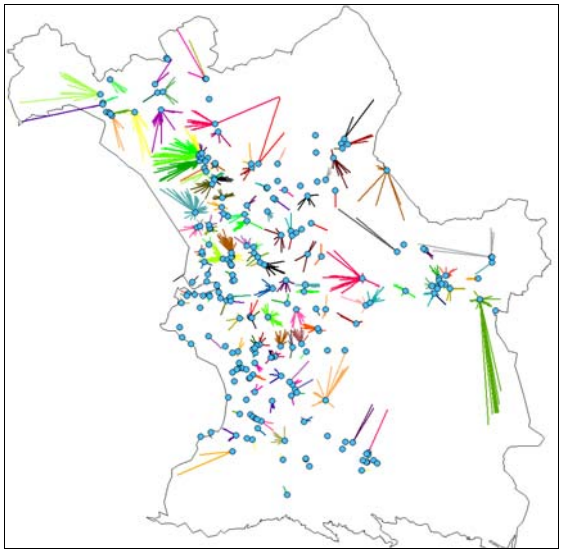
Carte 34 : Postes clients raccordés et postes clients non raccordés après l'étape 2.

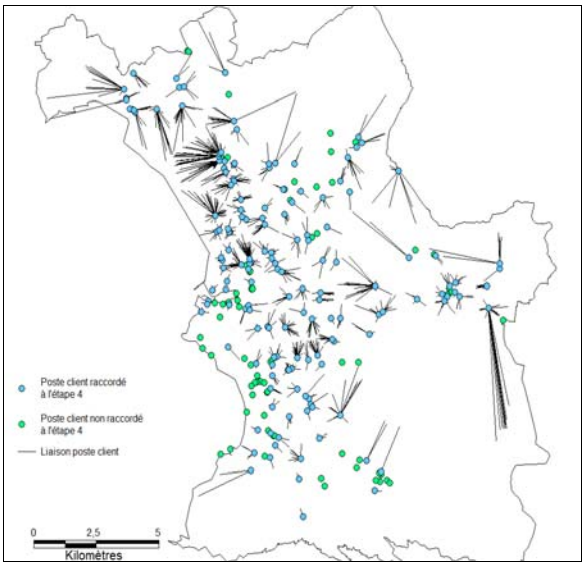
A ce stade, sur les 816 postes de notre ensemble, 356 trouvent une attribution. Toutefois, dans la mesure où la méthode est réalisée à partir de cellules de Voronoï de tailles plus importantes que dans la première étape, le nombre de bâtiments possiblement raccordés augmente également ; le nombre de liens possibles par nœuds électriques, et la distance de ces liaisons a donc tendance à augmenter. Ces liaisons ont donc une certitude moindre que celles obtenues précédemment. D'autre part, les liaisons très longues en termes de distance dans la partie sud-ouest ne correspondent pas à un éventuel bug mais s'expliquent par la forme assez allongée des cellules de Voronoï dans cette zone limitrophe (carte 34). Pour les 460 postes clients qui demeurent sans attribution, nous choisissons de considérer qu'ils peuvent appartenir à n'importe quel type de bâti (en incluant également les bâtiments résidentiels, les bâtiments industriels de taille inférieure à 10 000 m² de surface aménageable et les bâtiments remarquables autres que ceux mentionnés précédemment). La condition d'appartenance est que le poste électrique soit implanté dans la surface réelle de l'emprise au sol du bâtiment. Grâce à cette troisième étape, nous parvenons à attribuer un bâtiment à 187 nouveaux postes électriques (répartis dans 132 bâtiments différents, ce qui laisse penser que certains bâtiments sont directement alimentés par plusieurs postes clients).

A partir des 273 postes restants, nous réalisons un nouveau pavage de Voronoï imbriqué, qui est ensuite croisé aux centroïdes des bâtiments restants après la seconde étape (nous excluons à nouveau les bâtiments résidentiels, industriels de moins de 10 000 m² de surface habitable et les bâtiments remarquables). Les cellules de Voronoï étant de taille nettement plus importante que dans les étapes précédentes, les liaisons possibles avec des bâtiments sont encore plus nombreuses, plus distantes et moins certaines que dans les étapes précédentes. 174 nœuds électriques trouvent alors une attribution potentielle alors que 99 demeurent encore totalement inconnus en termes d'attribution. Dans la carte 36, la couleur des liaisons se différencient en fonction de leur poste client d'attribution, on voit que par rapport aux résultats de l'étape 2, la contrainte qu'un poste client se situe à proximité de son bâti de desserte est de moins en moins respectée, et le nombre de clients possibles augmente fortement.



Carte 35 : Partitions de Voronoï imbriquées à partir des 273 postes restants.

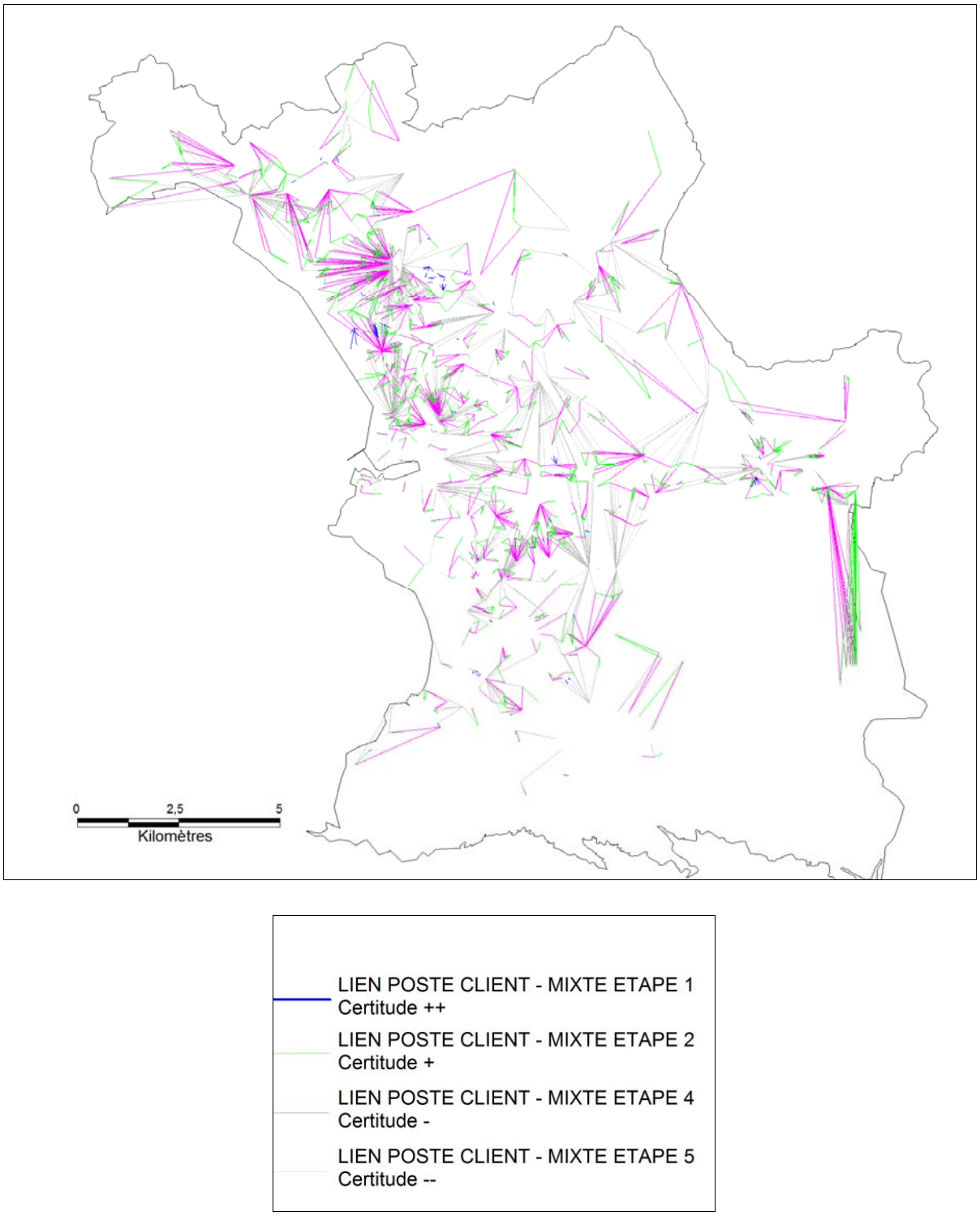




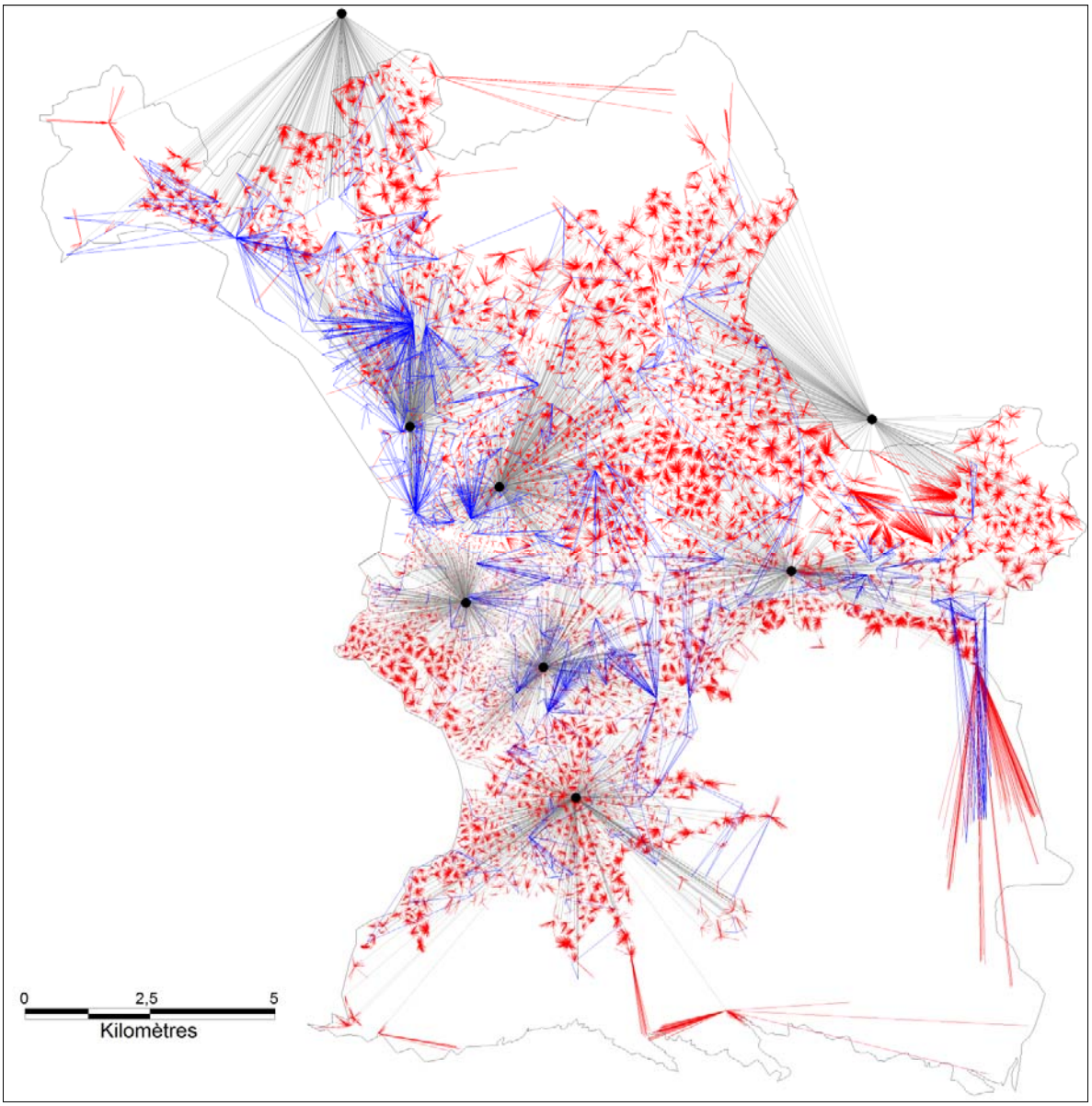
Carte 36 : Postes clients raccordés et postes clients non raccordés après l'étape 4.

Nous menons alors une nouvelle étape à partir des 99 postes restants. Toutefois, ces cellules de Voronoï ne sont pas imbriquées car plusieurs zones de dépendance des postes sources comprennent à cette étape moins de trois points. Assez logiquement, on note une nouvelle augmentation importante du niveau d'incertitude sur le raccordement des postes clients et mixtes et des distances très fortes entre les nœuds électriques et les nœuds de bâti restant. Malgré l'incertitude des liens établis, plusieurs nœuds électriques demeurent toujours sans aucune affectation, on peut voir sur la dernière carte que ces nœuds sont concentrés essentiellement dans la zone au sud du Vieux Port, qui comprend beaucoup de postes clients dans une faible surface (ce qui induit des polygones de Voronoï de petite taille) alors que parallèlement, cette même zone contient assez peu d'activités industrielles. La zone de postes non affectés en bordure du littoral pourrait être raccordée à des équipements que nous n'avons pas pris en compte jusqu'à présent, liés par exemple au traitement de l'eau.

Carte 37: Partition de Voronoï sur les 99 postes restants, postes clients raccordés et postes clients non raccordés après l'étape 5.



Carte 38 : Synthèse des liaisons établies à partir des postes clients et mixtes représentées en fonction de leur niveau de certitude.



Liaison Poste source vers
Poste distribution et poste client

Liaison Poste Distribution Publique
Vers Batiment résidentiel

Liaison Poste Client
Vers Batiment d'activités

Carte 39: Synthèse des interdépendances imbriquées entre le système « électrique » et le système « bâti » dans le système urbain.

Dans la carte 38, on considère qu'à chacune des étapes de raccordement, la certitude sur les interdépendances entre poste électrique client et bâtiment a eu tendance à diminuer. Les liaisons les plus certaines en bleu et en vert sont donc aussi les plus petites en termes de taille (et donc les moins visibles), alors que les liaisons de taille importante comme celles tracées en gris et en rose sont plus visibles mais nettement certaines.

La carte 39 est une synthèse des interdépendances verticales établies entre les postes sources, les postes électriques de distribution et l'ensemble des bâtiments de la commune de Marseille. Les liaisons en rouge entre les postes de distribution publique et les bâtiments résidentiels sont assez courtes comparativement à celles en bleu établies entre les postes de distribution client et les bâtiments industriels et commerciaux. Ces longues liaisons expriment le niveau de connaissance plus incertain de ce type d'interdépendances verticales et ne doivent pas s'interpréter comme le signe que les liaisons entre les postes clients vers les bâtiments industriels sont réellement plus distantes que dans le cas des relations entre postes de distribution publique et bâtiments résidentiels. En revanche, les liaisons de longueur importante, des postes sources aux postes de distributions de rang inférieur, représentées en noir, bien qu'empreintes d'une part d'incertitude, expriment en partie cette idée. Même si elle est incomplète, imprécise et incertaine, cette première connaissance de la criticité et de la dépendance électrique dans les territoires urbains, permet d'envisager les systèmes de risques en termes de dommages et de trajectoires spatiales des effets dominos.

De manière à préciser les possibilités de déclenchements des systèmes de risques associés à ces interdépendances, dans la suite de ce chapitre, notre intérêt se porte sur les effets dominos des inondations sur les réseaux techniques dans la commune de Marseille.

5.2 LA MÉMOIRE DES INONDATIONS ET DES ENDOMMAGEMENTS DES RÉSEAUX TECHNIQUES

5.2.1. Les effets dominos mémorisés par les riverains, l'exemple des pannes électriques consécutives aux inondations

5.2.1.1. La vulnérabilité des différents types de réseaux urbains

Comme souligné en introduction, cette sous-partie du chapitre 5 reprend une partie de notre contribution au programme de recherche RDT « Mémoires, oublis et (ré)appropriations : le risque inondation dans la basse vallée du Rhône et l'agglomération marseillaise» (Claeys et al., 2009). Dans ce cadre, une enquête à partir d'un questionnaire pluridisciplinaire sur les inondations a permis d'interroger 400 habitants marseillais au sujet des inondations dans leur commune (questionnaire en annexe). Initialement, dans le cadre de cette enquête, les objectifs de la contribution géographique (Voiron, Dutozia, 2009) concernaient les effets dominos vécus par les habitants marseillais et consistaient à identifier des zones et des populations non concernées par l'inondation mais seulement par ses impacts indirects (coupure de réseau électrique en particulier).

Dans cette logique, nous souhaitions montrer que la forme spatiale du système de risques inondation ne se limite pas simplement aux périmètres inondables classiques, mais s'étend potentiellement à l'ensemble des territoires qui sont interdépendants avec ce premier périmètre. Cette typologie aurait pu permettre d'affiner la dichotomie « sinistré » / « non sinistré » en ajoutant une graduation du niveau de risque subi, en fonction de différentes combinatoires possibles entre impacts directs et impacts indirects, permettant par la suite d'analyser la manière dont ces populations appréhendent et mémorisent, ou pas, les effets dominos de l'inondation ; mais aussi la manière dont elles peuvent dissocier dans le processus de mémorisation, l'inondation en elle-même (ce qui se rapporte à l'eau) et ses conséquences.

Toutefois, en raison de plusieurs contraintes méthodologiques et logistiques nous avons dû reformuler nos objectifs initiaux. En premier lieu, l'inévitable longueur du questionnaire interdisciplinaire et d'autre part, la taille limitée de l'échantillon du fait de considérations matérielles et temporelles, ont conduit à limiter sa diffusion aux zones inondables, mettant en cause notre premier objectif. En second lieu, la partie des questions relatives aux coupures de réseaux a dû être filtrée par une première question : « *vous personnellement, avez vous déjà subi les conséquences d'une inondation suite à une crue ou à des orages* », ayant pour conséquence de réduire la taille de la sous-population concernée par les questions sur les réseaux. De ce fait, il n'a pas été possible d'identifier des personnes qui n'avaient pas le sentiment d'avoir subi de conséquences des inondations tout en se souvenant avoir vécu des coupures électriques, d'éclairage public ou de téléphone, ce jour-là.

Compte tenu des faibles taux de réponses aux questions sur les réseaux (de 30% à 4% de l'effectif total selon les questions), l'ensemble des résultats portant sur ces questions est à interpréter avec une grande prudence ; toutefois plusieurs éléments et différenciations spatiales nous paraissent suffisamment marqués pour proposer quelques interprétations.

Pour l'ensemble de la zone de Marseille, les résultats de l'enquête semblent bien confirmer que le réseau de distribution électrique est particulièrement vulnérable aux inondations puisque 52% des populations inondées se souviennent de coupures électriques. Comparativement aux autres types de réseaux urbains, les réseaux électriques semblent donc bien être les plus sensibles à l'inondation, ou du moins les populations ont mémorisé davantage de coupures électriques autour des inondations que de dommages à d'autres types de réseaux.

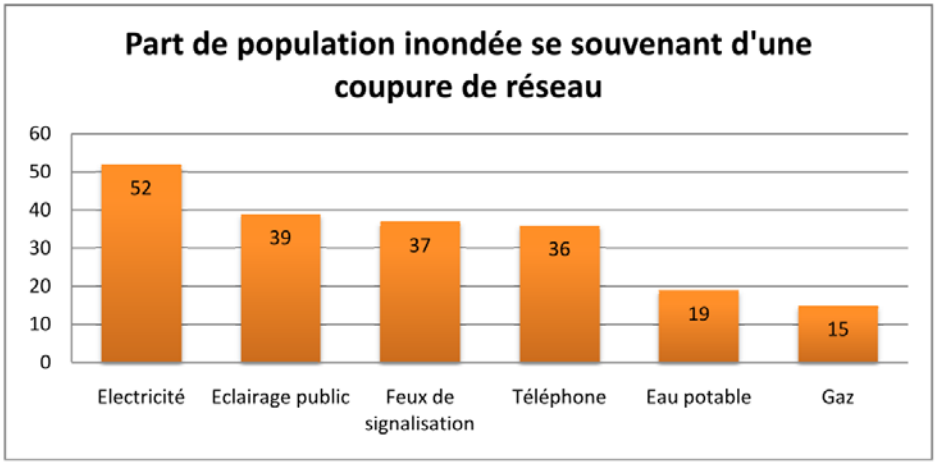


Figure 44 : Vulnérabilité aux inondations des différents types de réseaux urbains dans la zone de Marseille.

5.2.1.2 . Une dissociation forte entre les deux secteurs d'enquête…

Dans le cadre de l'enquête RDT, le territoire marseillais a été décomposé en deux sous-ensembles : le secteur du Vieux Port impacté principalement par des orages et des phénomènes de ruissellement ; et le secteur de la Basse Huveaune qui peut être impacté à la fois par des débordements de l'Huveaune et du Jarret, et par des phénomènes de ruissellement. Nous ne reviendrons pas sur les méthodes spatiales mises en place dans la délimitation des secteurs de l'enquête ni sur l'échantillonnage de la population enquêtée, elles figurent dans le rapport de recherche RDT et sortent du cadre plus ciblé de cette recherche doctorale. Du point de vue, des effets dominos liés aux coupures de réseaux, cette distinction en deux zones s'est avérée particulièrement pertinente, et a facilité la mise en évidence d'une dissociation forte entre les deux secteurs marseillais. Celle-ci tient à plusieurs aspects qui seront pour l'instant considérés de manière indépendante.

Au niveau de la gravité des coupures électriques, d'après les résultats de l'enquête, le secteur de l'Huveaune est majoritairement concerné par des pannes électriques pouvant durer d'une journée à plusieurs jours (plus de 75% des pannes électriques mémorisées dans ce secteur), alors que les pannes électriques mémorisées dans le secteur du Vieux Port concernent principalement des pannes d'une durée de quelques heures (plus de 75% des pannes électriques mémorisées pour ce secteur) et qu'aucune panne électrique de plusieurs jours n'a été mémorisée par les populations. Au niveau des impacts des inondations sur les réseaux de gaz et d'eau potable, puisque pour le secteur du Vieux Port aucune coupure de gaz, ni d'eau potable n'est recensée, alors que ces pannes concernent respectivement 25% et 31% des souvenirs d'inondations exprimés par les populations du secteur de l'Huveaune. La distinction est également marquée pour les réseaux d'éclairage public et de signalisation alors qu'elle semble assez peu significative pour les réseaux d'électricité et de téléphone.

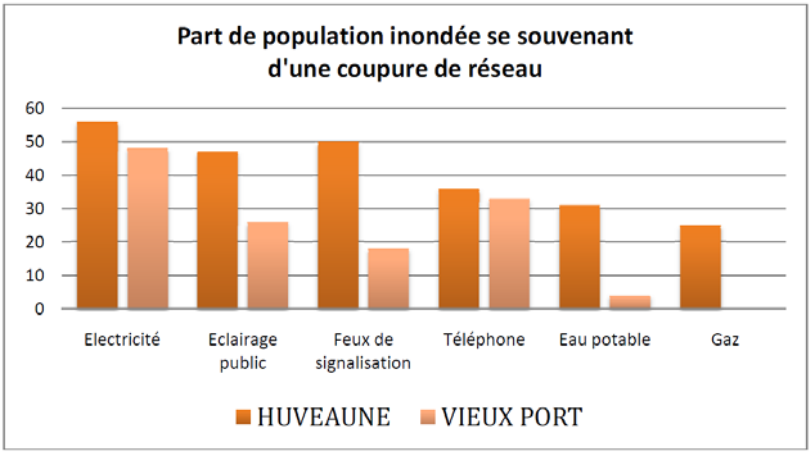
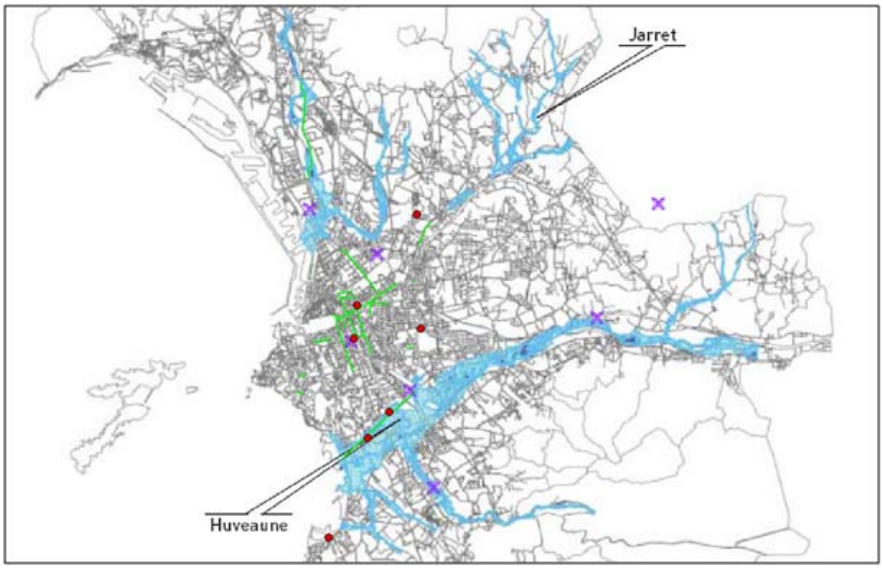


Figure 45 : Vulnérabilité des différents types de réseaux urbains dans les zones de la Basse Huveaune et du Vieux Port.



Carte 40 : Périmètre inondable de l'Huveaune, du Jarret et des Aygalades (en bleu) et rues de la zone centrale du Vieux Port impactés lors de l'inondation de 1907 (en vert).

5.2.1.3. …Qui tient principalement à des évènements de référence différents

Une interprétation purement spatiale d'une distinction si marquée entre les deux zones d'étude marseillaises conduirait à en déduire une vulnérabilité plus importante des réseaux techniques de la Basse Huveaune que ceux de la zone du Vieux Port. Pourtant, même si rien ne permet d'exclure cette hypothèse, une analyse plus poussée des résultats de l'enquête nous conduit à apporter une autre explication liée au fait que les coupures électriques de référence, mémorisées par les populations, correspondent à deux évènements différents : ainsi l'inondation de janvier 1978, liée à la crue de l'Huveaune, apparaît comme un élément structurant majeur pour la mémoire du risque dans le secteur de la Basse Huveaune (70% des coupures électriques mémorisées par les populations du secteur sont antérieures à 1978 dont 53% pour cette seule année), alors que ce sont les orages de 1999 qui ressortent le plus

distinctement pour le secteur du Vieux Port (90% des coupures électriques mémorisées par les populations du Vieux Port sont postérieures à 1999 dont 40% pour cette seule année).

Les deux secteurs ont donc une mémoire du risque qui est construite autour de deux évènements différents (voire même deux périodes) ce qui explique sans doute en partie la dissociation très marquée observée dans la partie précédente. Pour expliquer cette différence d'évènement de référence, la structure par âge des personnes enquêtées est tellement distincte entre les deux secteurs, que son rappel s'avère incontournable :

	Modalité	*Effectif*	Fréquence (%)
Vieux port	20-24 ans	*14*	14,0
	25-59 ans	*69*	69,0
	60 ans et +	*17*	17,0
	Total	100	100

	Modalité	*Effectif*	Fréquence (%)
Huveaune	20-24 ans	*5*	4,9
	25-59 ans	*37*	35,9
	60 ans et +	*61*	59,2
	Total	103	100

Tableau 4 : Structure par âge des populations des deux secteurs d'étude marseillais.

D'autre part, il est intéressant de noter que la date d'inondation la plus marquante vécue par les habitants (questions 24, 55 du questionnaire) correspond dans les deux cas à la date où les coupures électriques étaient les plus importantes (ou du moins les mieux mémorisées). Ainsi, dans le cas du Vieux Port, l'inondation la plus marquante 1999 correspond à celle pour laquelle les populations se rappellent le plus nettement de coupure électrique ; alors que pour le secteur de l'Huveaune, c'est l'évènement de 1978 qui ressort le plus nettement dans la mémoire des populations, à la fois comme inondation marquante et au niveau des coupures électriques. Cette correspondance entre année de l'inondation marquante et année des coupures électriques mémorisées peut s'interpréter de plusieurs manières qui ne s'excluent pas nécessairement les unes et les autres :

- On peut d'abord considérer que des dommages au réseau électrique contribuent à rendre l'inondation plus marquante pour les populations. La coupure électrique est en quelque sorte un facteur aggravant qui génère ou du moins renforce la mémorisation du sinistre.
- On peut également considérer que les dommages au réseau sont de bons marqueurs pour estimer la gravité d'une inondation. Plus précisément, dans la correspondance entre année de l'inondation marquante et date des coupures électriques mémorisées, il n'y a pas nécessairement un effet de la coupure électrique sur la mémorisation de

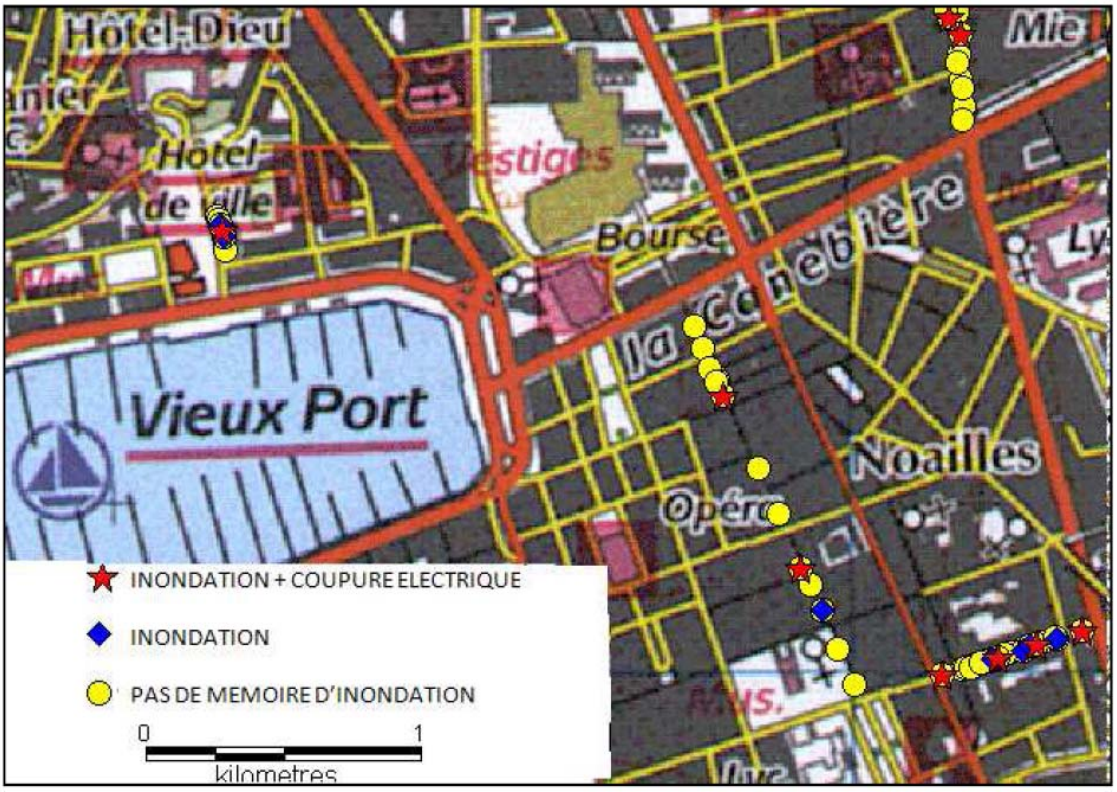
l'inondation, par contre, le fait que des coupures électriques importantes soient signalées, indique avant tout, que l'inondation était suffisamment importante pour les déclencher.

- On peut enfin penser que c'est le souvenir d'une inondation particulièrement grave qui conduit les populations à surestimer les impacts indirects, dont ceux sur les réseaux électriques.

Au sujet d'éventuelles interdépendances des pannes des différents réseaux, pour le secteur de l'Huveaune, les récentes crises (1999, 2000, 2003) qui ont engendré des pannes électriques n'ont pas été accompagnées nécessairement de pannes d'autres réseaux, alors que ce fut le cas pour la majorité des évènements de 1977 et 1978. Il semblerait également que les coupures de gaz, d'eau et de téléphone sont quasi systématiquement associées à une coupure électrique, dans le sens où les populations qui ont souvenir d'avoir vécu des coupures des réseaux précités ont également vécu des coupures électriques lors du même évènement. Par contre, plusieurs cas de dysfonctionnements d'éclairage public et de feux de signalisation ne sont pas accompagnés de coupures électriques au domicile des personnes (en particulier dans le Vieux Port).

5.2.1.4. Les effets dominos sur le Vieux Port, une mémoire d'évènements récentes dont ne découle aucun ordre spatial apparent

Sur les 104 personnes enquêtées dans ce secteur, seulement 27 ont souvenir d'avoir vécu une ou plusieurs inondations, dont 13 se souviennent également d'une coupure électrique. La part de personnes qui se souvient avoir vécu une coupure électrique est moins importante dans cette zone que dans le secteur de la Basse Huveaune (respectivement 48% et 56% des populations inondées). Pour le secteur du Vieux Port, il semble difficile de distinguer une quelconque organisation spatiale dans la répartition des coupures électriques, ou même des personnes inondées. Certes, on peut noter sur la carte, une légère concentration Rue Dieudé (au Sud Est dans la carte 41) de 9 personnes inondées dont 4 qui ont souvenir d'une coupure électrique (inférieure à 1 heure et accompagnée de coupure téléphonique). Toutefois, cette « concentration » est à relativiser du fait du très grand nombre de personnes enquêtées dans cette rue (32 personnes enquêtées au total pour cette seule rue). Ainsi, en termes de proportion, la zone est légèrement supérieure à celle de l'ensemble de la zone Vieux Port, sans que cet écart à la moyenne soit suffisamment significatif pour pouvoir lui donner une importance particulière.



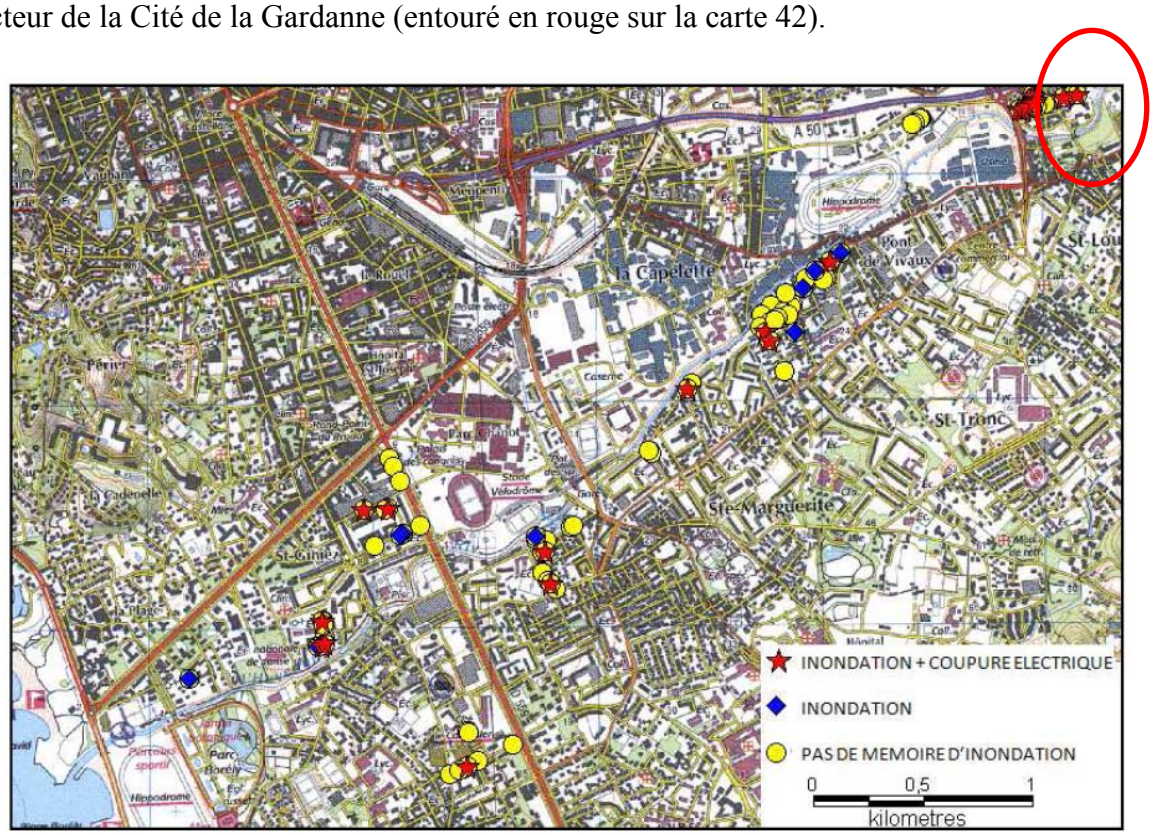
Carte 41: Populations enquêtées, populations inondées et populations ayant subi des coupures électriques dans le secteur du Vieux Port.

5.2.1.5. Les effets dominos dans la Basse Huveaune, une mémoire plus ancienne, concentrée spatialement et socialement homogène

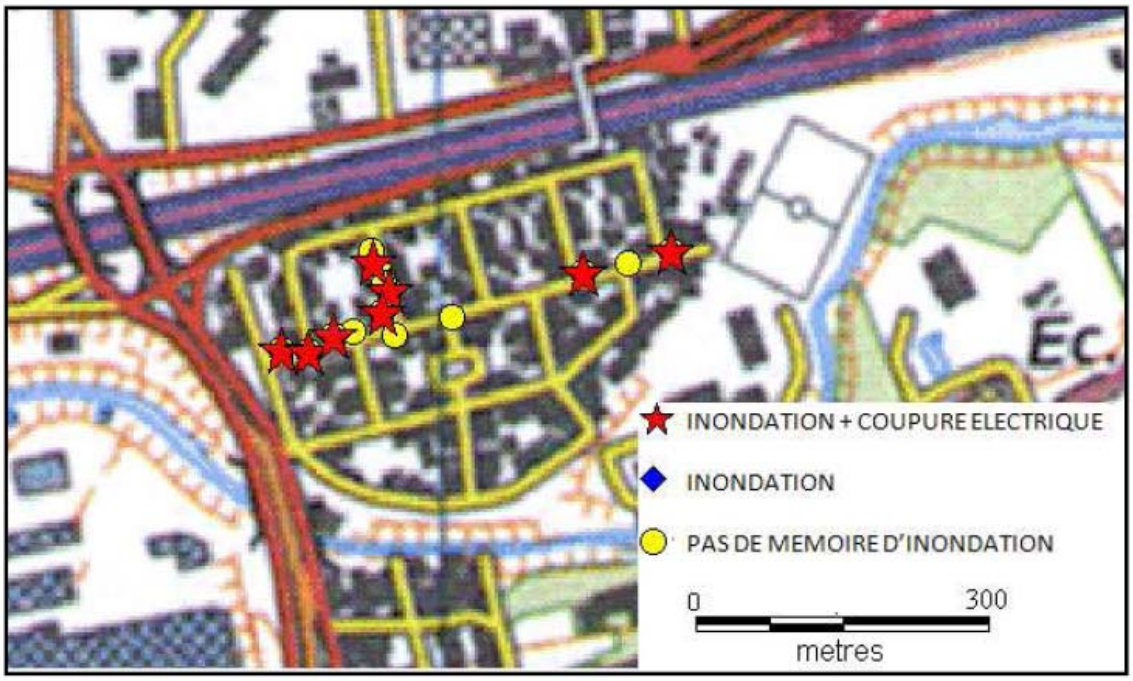
Même si l'évènement de référence est bien plus ancien dans le cas de l'Huveaune et même si les populations enquêtées tendent à être bien plus âgées que dans le secteur du Vieux Port, on note d'abord que la part de personnes qui déclarent ne plus se rappeler si les inondations étaient accompagnées de coupures électriques n'augmente pas de manière significative (15% pour le secteur du Vieux Port, dont la mémoire repose sur l'évènement de 1999 contre 17% pour le secteur de la Basse Huveaune dont la mémoire est ancrée à l'évènement de 1978). Les années écoulées et l'ancienneté de l'évènement marquant ne semblent donc pas avoir *a priori* « gommé » ou estompé les impacts indirects dans le souvenir de l'inondation.

Bien que l'effectif total de la population enquêtée soit approximativement similaire pour les deux zones d'étude, la surface couverte pour le secteur de la Basse Huveaune est nettement plus importante que dans le cas du Vieux Port et permet d'identifier que l'extrême nord est une zone de forte concentration de souvenirs de coupures électriques. Ce secteur correspond à la Cité de la Gardanne, qui est constituée notamment de maisons individuelles de plain-pied, où les populations enquêtées ont un profil social et démographique assez homogène puisqu'il s'agit essentiellement de population de plus de 60 ans dont les revenus mensuels sont compris dans une fourchette allant de 500 à 1000 euros. Pour ce secteur, l'inondation de 1978 est très clairement l'évènement de référence (95% des cas). Alors que sur l'ensemble de la commune de Marseille, seulement 16% des personnes enquêtées se souviennent avoir vécu une

inondation ayant entraîné des coupures électriques ; ce taux monte à plus de 50% dans le secteur de la Cité de la Gardanne (entouré en rouge sur la carte 42).



Carte 42 : Populations enquêtées, populations inondées et populations ayant subi des coupures électriques dans le secteur de la Basse Huveaune.



Carte 43: L'importante mémorisation des souvenirs d'impacts indirects de l'inondation dans la Cité de la Gardanne en bordure immédiate de l'Huveaune.

On note également, que parmi toutes les personnes qui ont souvenir d'une inondation dans ce secteur, aucune d'elles n'a le souvenir d'une inondation sans coupure électrique, comme en témoigne l'absence de carrés bleus sur le document ci-dessus. Ainsi dans ce secteur, parmi les personnes se souvenant d'avoir vécu une inondation, 100% d'entres elles se souvenaient également d'une coupure électrique pouvant durer d'une journée à plusieurs jours ; l'effet domino est donc ici particulièrement bien mémorisé par les populations (sans doute du fait de sa durée ; mais également parce que ces coupures d'électricité étaient associées systématiquement à des coupures de gaz, d'eau courante et de téléphone ayant elles-mêmes duré plusieurs jours).

5.2.1.6. Mise en perspective avec les dommages et la durée des dysfonctionnements lors d'une catastrophe de grande ampleur

Une mise en perspective à laquelle il nous a semblé intéressant de procéder consiste à comparer la durée des coupures des différents réseaux techniques mémorisés par les victimes d'inondations à Marseille (figure 46) avec les durées de coupures de réseaux observées lors d'une autre crise de grande ampleur sur laquelle on pourrait disposer de données comparables.

Pour le cas de Marseille, nous avons déjà souligné que la majeure partie des populations inondées se souvenait d'avoir subi parallèlement une coupure électrique ; la durée de ces coupures électriques concerne majoritairement des coupures de l'ordre de quelques heures. Les dommages aux autres réseaux sont moins fréquents, on peut souligner que les dommages observés sur le réseau d'eau potable sont plus rares, mais semblent durer au moins une journée lorsqu'ils sont déclenchés.

Comme évènement de comparaison, nous avons choisi de nous appuyer sur les travaux menés dans le comté de Harris, au sud est de l'Etat du Texas (figure 47), et plus particulièrement sur l'enquête menée dans cette zone après le passage du cyclone Ike en 2008 (Stein et *al.*, 2009). L'intérêt de cet exemple est de montrer que la durée des coupures des réseaux techniques est un moyen original et pertinent de comparer des évènements à risque qui ne sont pas réellement équivalents d'un point de vue physique. Ainsi, comparer directement les hauteurs d'eau des inondations marseillaises avec les vitesses de vents d'un cyclone à Houston n'aurait pas d'intérêt. En revanche, l'importance et la durée des dysfonctionnements de réseaux techniques engendrés par ces perturbations donnent un point de comparaison sur le niveau de désorganisation auquel a du faire face le système territorial suite à la crise, sur le degré d'endommagement du système technique et sur sa résilience.

Pour le cas de la tempête Ike, on voit clairement que l'endommagement électrique constitue à la fois le dommage le plus fréquent en termes de déclenchement et le dommage le plus persistant en termes de durée puisque près de 90% des habitants subissent des coupures de plusieurs jours. La très faible part de dysfonctionnements ayant duré plusieurs heures à moins d'une journée souligne l'importance des dommages occasionnés, qui empêche alors une restauration rapide du service. On remarque aussi que, dans un cas comme dans l'autre, les dommages les plus fréquents concernent dans l'ordre, le réseau électrique, puis le réseau téléphonique et enfin le réseau d'eau potable. On peut noter aussi que cette approche considère de la même manière une coupure d'eau potable liée à l'endommagement physique

du réseau d'eau potable, qu'une coupure d'eau potable qui serait liée par exemple à la perte de l'approvisionnement électrique.

D'après les dommages aux réseaux, il apparaît que l'impact et la désorganisation territoriale successive à l'évènement Ike soit d'une ampleur bien plus importante que les dommages mémorisés lors des différentes inondations ayant impacté la commune de Marseille. Ces disparités sont particulièrement visibles en considérant la durée des coupures électriques ; elles sont, en revanche, nettement moins importantes si on regarde par exemple le nombre de personnes ayant subi une coupure d'eau potable, ce qui nous laisse penser que les coupures électriques et leur durée seraient potentiellement un bon indicateur pour différencier le niveau de gravité d'un évènement à risque.

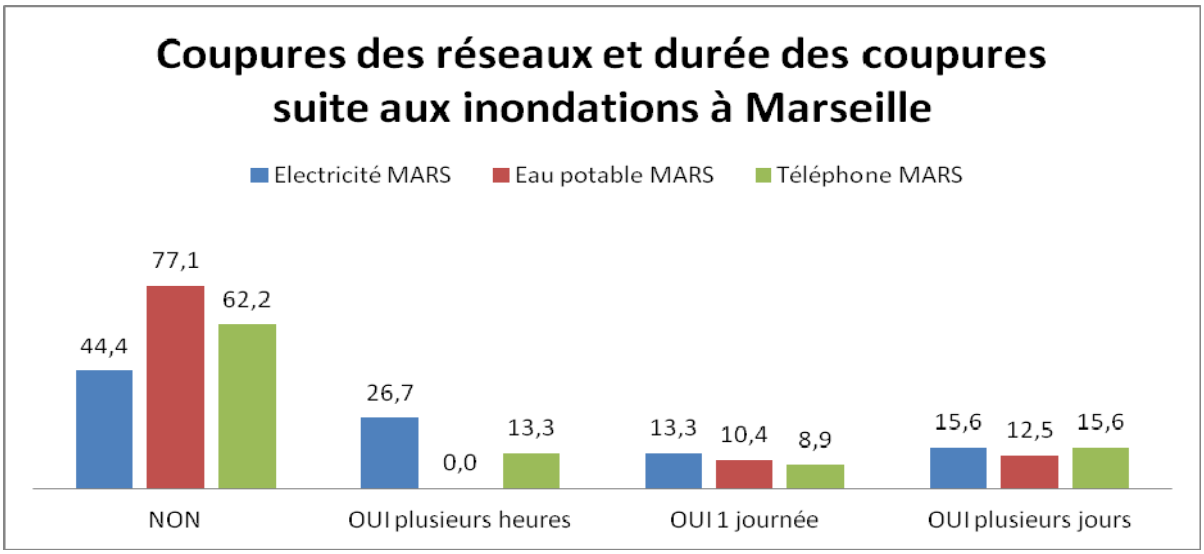


Figure 46 : La durée des coupures de réseaux successives aux inondations à Marseille (source : Enquête RDT).

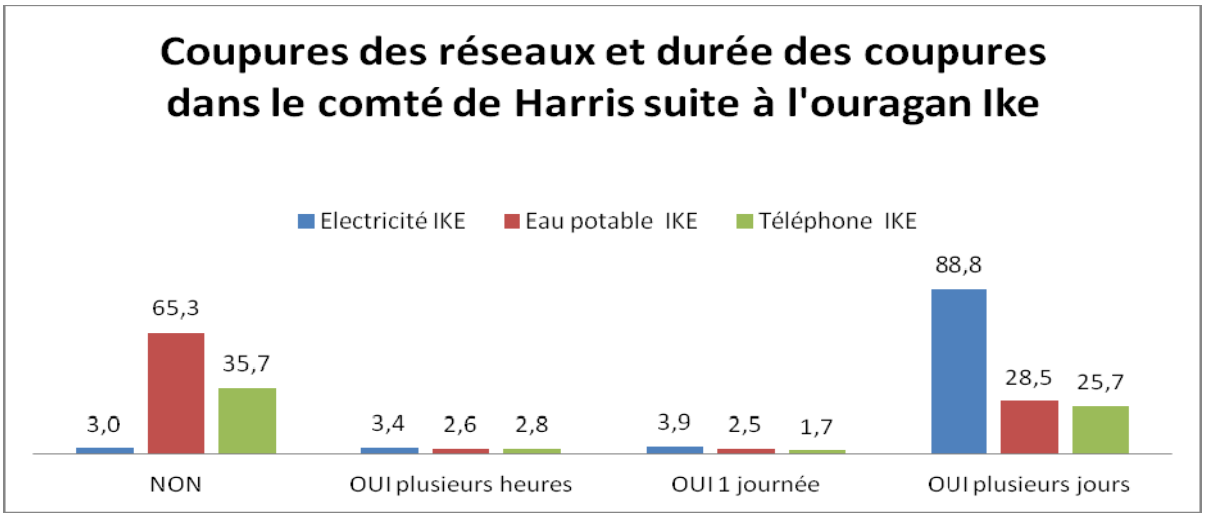


Figure 47 : La durée des coupures consécutives au passage de l'ouragan dans le Comté de Harris en juillet 2008 (source : Stein, 2009).

5.2.2. Les effets dominos de l'inondation mémorisés par les gestionnaires électriques

5.2.2.1. De la relativité des périmètres inondables à une vulnérabilité variable des réseaux électriques

S'interroger sur la place et le rôle de la mémoire du risque dans la construction d'une stratégie de gestion des inondations pour les réseaux électriques, nous conduit à adopter une posture scientifique particulière et par moment délicate, qui consiste à considérer l'exploitant du réseau électrique marseillais ERDF comme étant à la fois une source d'informations et comme une partie de notre objet d'étude.

De plus, les difficultés liées à la disponibilité et la confidentialité de certaines informations demandées, s'avèrent d'autant plus pénalisantes qu'un de nos objectifs consiste justement à savoir comment se construit la mémoire du risque pour les gestionnaires de réseaux électriques et comment ces derniers perçoivent l'interaction entre l'inondation et le réseau électrique. Dès lors, la dichotomie radicale entre oubli et mémoire du risque est ici complexifiée et à nuancer en fonction de degrés variables d'imprécision, d'incertitude, d'incomplétude, allant même jusqu'à ce qu'on pourrait appeler la fermeture de la mémoire (par opposition à une mémoire « ouverte », qui serait dans une dynamique de diffusion de ses connaissances et expériences sur les inondations). Ensuite, à supposer qu'elle existe, on peut se demander si cette mémoire du risque conduit le gestionnaire de réseaux à des mesures d'anticipation, de prévention ou encore de protection des installations électriques ? Il s'agit alors d'évaluer dans quelle mesure des « données de mémoire » sur les inondations passées, qu'elles se soient construites sous forme de retours d'expérience, de cartographies ou de bases de données, peuvent être par la suite remobilisées dans la perspective d'améliorer la gestion d'inondations futures.

La mémoire du risque tout comme sa gestion repose en premier lieu sur un ancrage territorial. La délimitation des périmètres inondables et leur appréhension par les gestionnaires électriques sont donc un éclairage important pour estimer dans quelle mesure les installations électriques sont physiquement vulnérables à l'inondation, déterminer quels sont les équipements électriques les plus vulnérables à l'inondation et enfin se demander si les équipements identifiés correspondent aux zones où, lors d'inondations passées, on a pu observer des coupures électriques importantes.

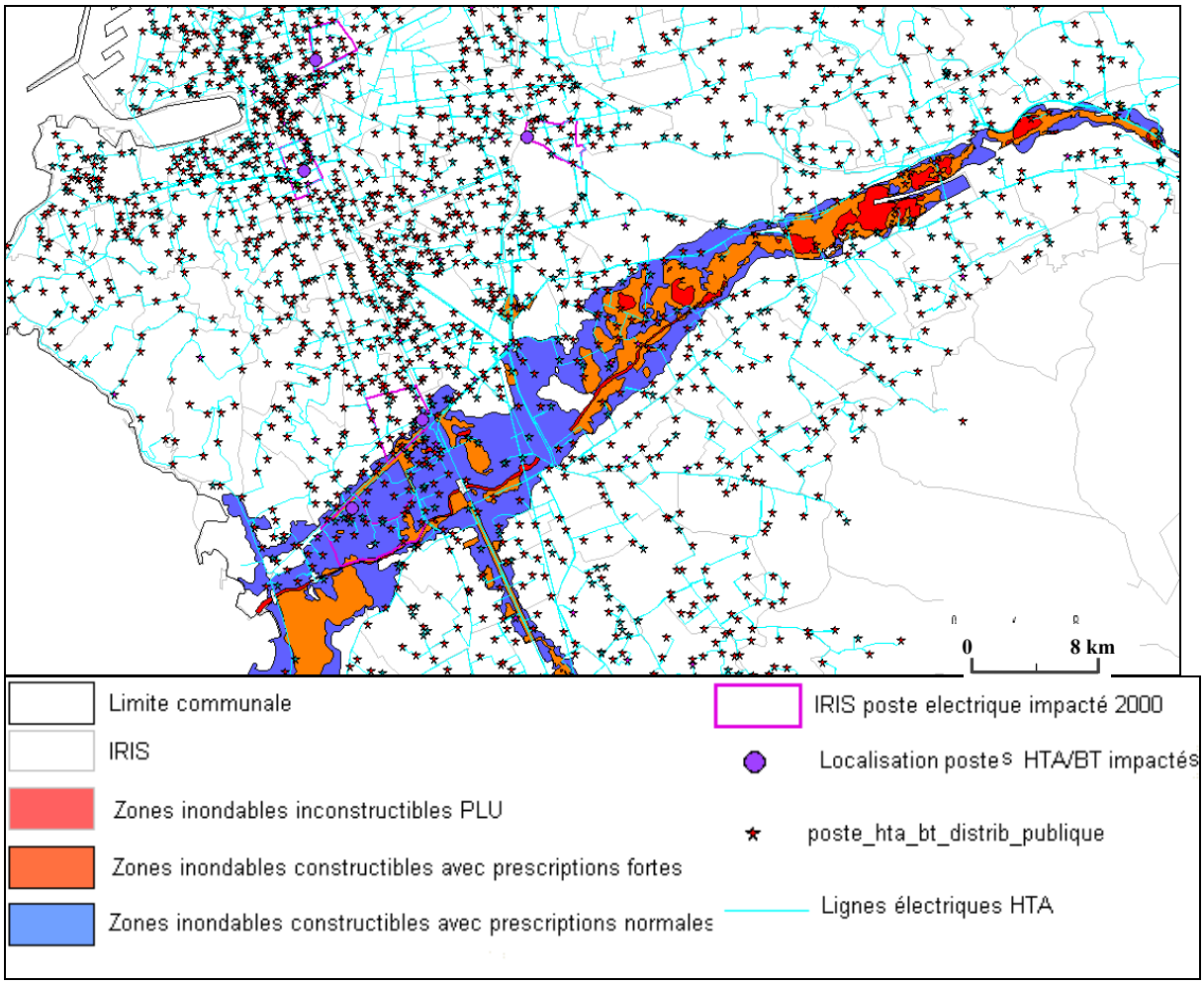
Plusieurs alternatives avaient été envisagées, la première était que le gestionnaire du réseau ne connaisse pas ou très peu les zones inondables de la commune, la seconde qu'il les connaisse parfaitement bien, enfin la dernière aurait été qu'il contribue lui-même à la création de connaissances des zones inondables en utilisant des informations liées à ses propres expériences de l'inondation. Evidemment, entre ces trois alternatives plusieurs solutions intermédiaires étaient à envisager. Dés le début de nos rencontres avec des responsables de l'exploitation du réseau de distribution électrique marseillais, il nous avait été indiqué que des périmètres de zones inondables avaient été transmis par la municipalité de Marseille sous forme de bases de données cartographiques. Toutefois, ces bases de données n'étaient pas utilisées car les zones inondables étaient dessinées avec des périmètres non fermés et que peu d'explications avaient été fournies sur leur méthode de construction ou encore sur leur

interprétation. Dès lors, l'hypothèse d'une connaissance parfaite des périmètres inondables ne peut être retenue.

Cette connaissance imparfaite des périmètres inondables n'est d'ailleurs pas une spécificité d'ERDF, puisqu'en réalité aucun acteur du territoire ne dispose d'une connaissance certaine et exhaustive des périmètres inondables, encore moins en zone urbaine. C'est d'ailleurs pour cette raison que le croisement cartographique entre équipements électriques et zones inondables, a été réalisé en plusieurs temps, et en tenant compte de plusieurs types de zones inondables issus de sources différentes. La relativité des périmètres de zones inondables nous a paru un élément important à souligner car il ressort assez nettement que selon le type de périmètre considéré, la vulnérabilité du réseau électrique va, elle-même, fortement varier (document ci-après). De ce fait, on peut penser que pour le gestionnaire électrique, l'inondation est un problème plus ou moins préoccupant (et qui nécessite donc plus ou moins d'effort de construction d'une mémoire) selon le périmètre inondable qu'il va intégrer comme espace du risque de référence et en fonction de la gravité des dommages et des coupures électriques liées aux inondations qu'il a pu observer et mémoriser par le passé.

Le premier type de zone inondable avec lequel nous avons souhaité croiser les équipements électriques correspond à celui du Plan Local d'Urbanisme de la commune de Marseille. Par rapport à l'ensemble des zonages de risque utilisé par la suite, il est le seul à contenir une portée réglementaire et législative. En effet, comme toute forme de construction, les équipements électriques sont soumis à une réglementation précise qui peut être plus ou moins restrictive et contraignante selon la gravité supposée des inondations de leur secteur d'implantation.

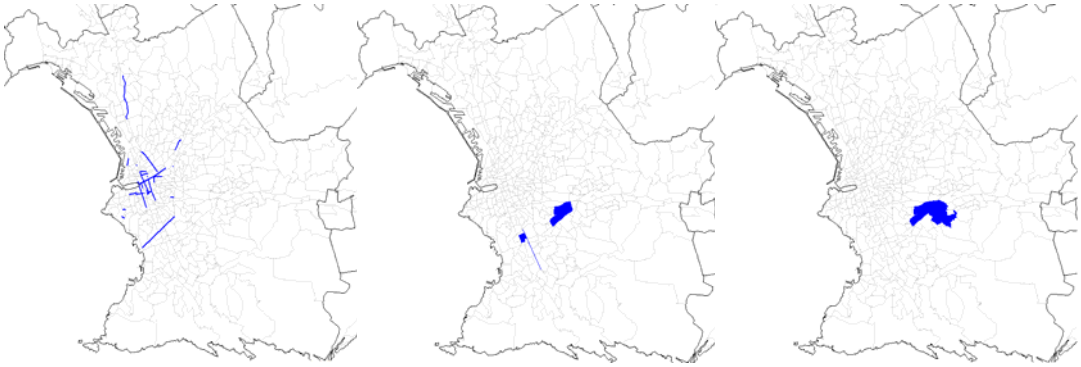
La graduation en trois niveaux de contrainte (inconstructible, prescription forte, prescription normale) a été conservée lors des croisements et fait ressortir que selon les périmètres considérés, la part d'équipement électrique concernée par l'inondation peut varier de 0.2% pour la zone inconstructible, jusqu'à 7.1% si on cumule les trois niveaux de restrictions d'usage des sols. Par ailleurs, d'un point de vue spatial, il est important de souligner que seuls les secteurs de l'Huveaune et du Jarret sont considérés comme inondables dans la réglementation d'urbanisme. Autrement dit, tout le secteur du Vieux Port, qui est pourtant fortement présenté dans les zonages de référence qui sont utilisés par la suite, n'est pas intégré dans ces premières estimations sur le niveau de vulnérabilité du réseau électrique marseillais à l'inondation.



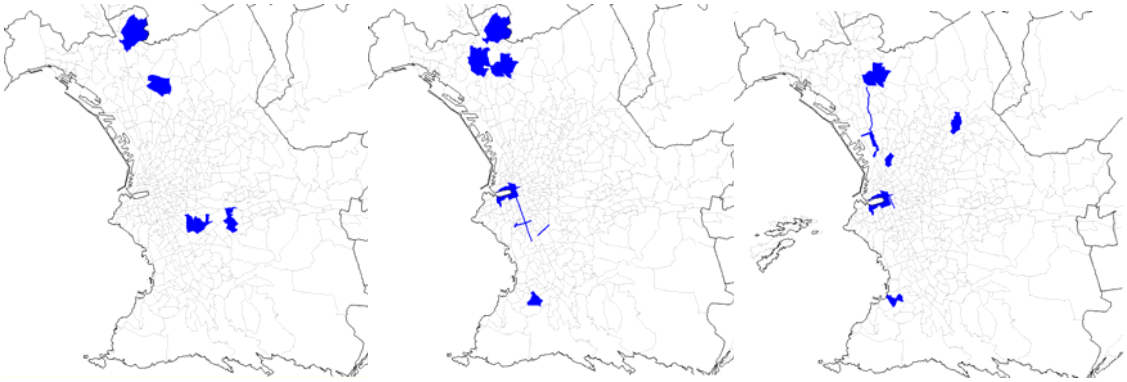
Carte 44 : Croisement du périmètre inondable du Plan Local d'Urbanisme avec les postes électriques et les postes électriques endommagés en 2000.

L'absence du secteur Vieux Port dans la réglementation des zones inondables en limite fortement l'intérêt en tant qu'espace de référence de la mémoire du risque inondation. C'est principalement pour cette raison que d'autres périmètres ont été intégrés dans l'analyse. Parmi ceux-ci, une autre donnée fournie par la Mairie de Marseille s'est avérée à la fois plus précise et plus exhaustive : les voies inondables. Des buffers ont été effectués autour des voies, de manière à transformer cette donnée de type linéaire en donnée de type zonal et rendre ainsi possible le croisement avec les équipements électriques. Comme on le constate sur le document suivant, la cartographie des voies inondables couvre un périmètre à la fois moins restrictif et plus précis que les périmètres inondables. Le croisement avec les équipements électriques a été testé successivement sur un buffer de 20 mètres et sur un buffer de 30 mètres des voies inondables. Enfin, le dernier espace de référence du risque inondation est issu de la cartographie des dommages d'inondations recensés dans la presse entre 1907 et 2003 et dans les archives municipales. Ces dommages ont été spatialisés à l'échelle des IRIS, ce qui a conduit, malgré la finesse du découpage, à certaines généralisations (rattacher un dommage purement ponctuel à l'échelle d'un IRIS entier). Nous reviendrons dans le chapitre 6 sur des méthodes permettant une meilleure prise en compte de l'hétérogénéité et l'imprécision de données rétrospectives dans une optique de spatialisation de l'information.

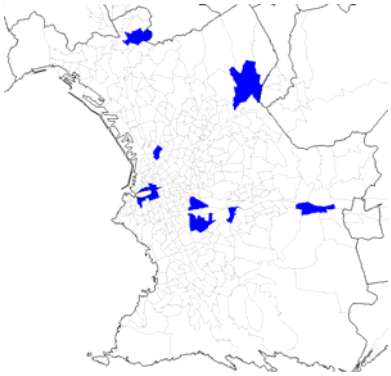
1907 **1951** **1972**



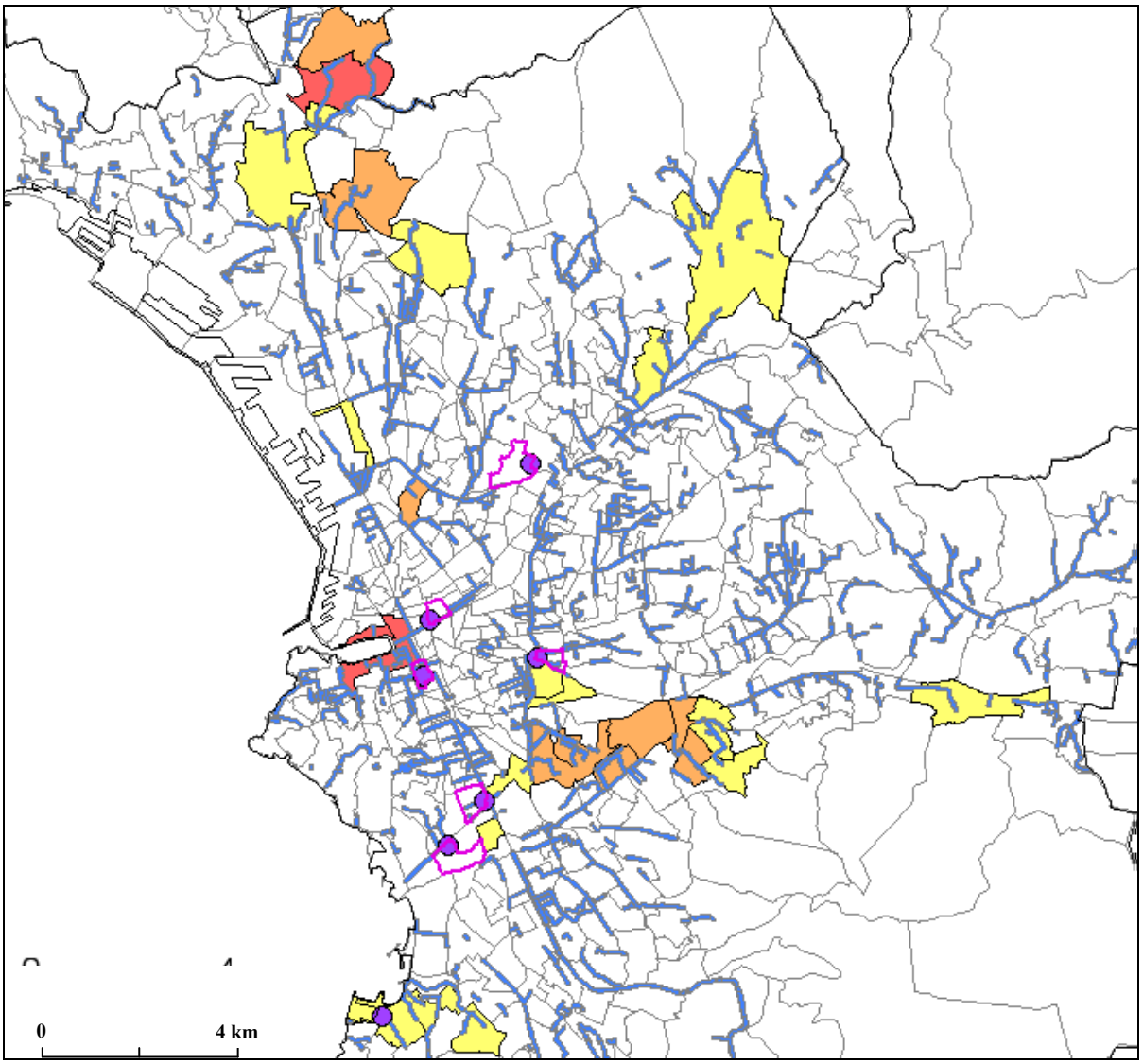
1978 **1993** **2000**



2003



Carte 45 : Regroupement à l'échelle des IRIS des zones touchées par des dommages matériels lors des inondations majeures dans la commune de Marseille depuis le début du 20ème siècle.



Limite communale

IRIS

3
2
1
Nombre d'inondations référencées

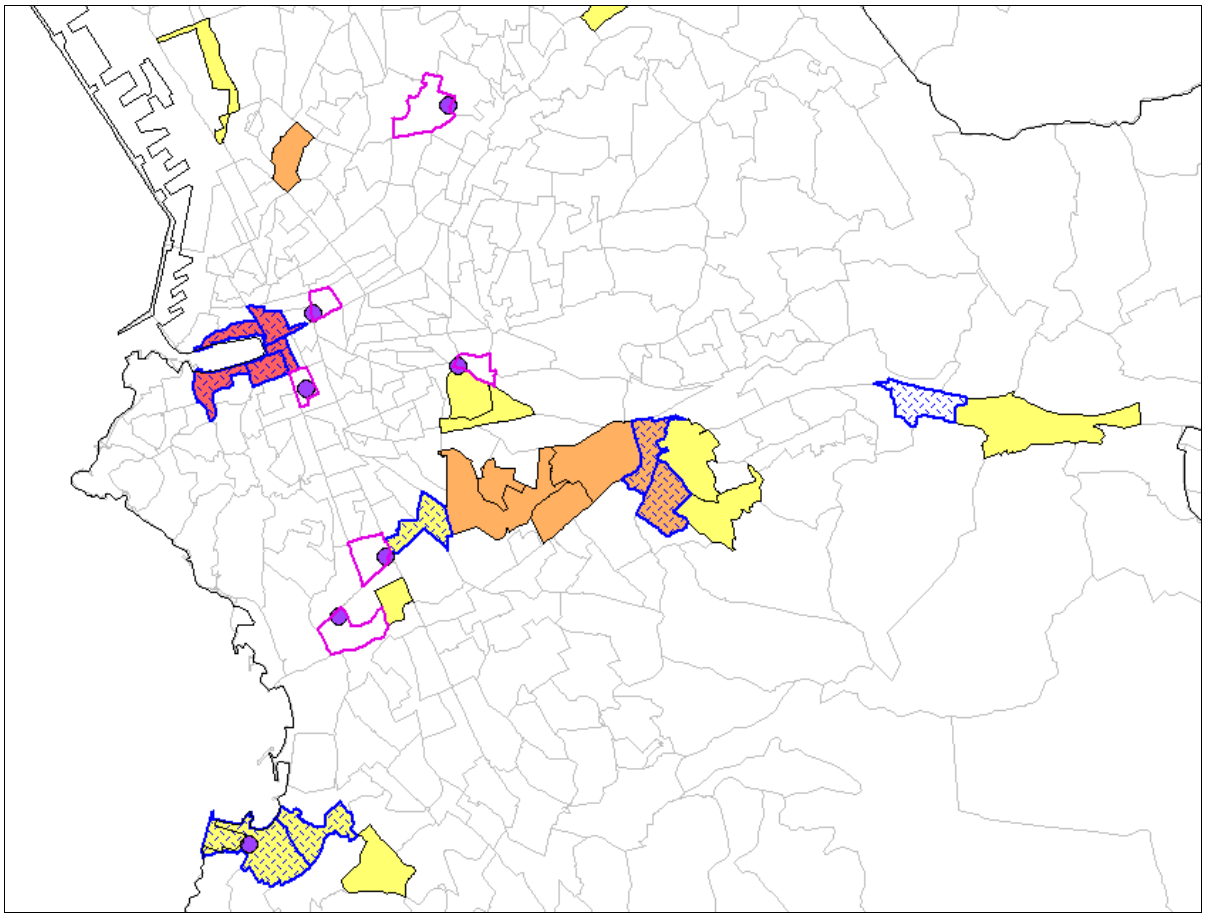
Voies inondables buffer 30 metres:

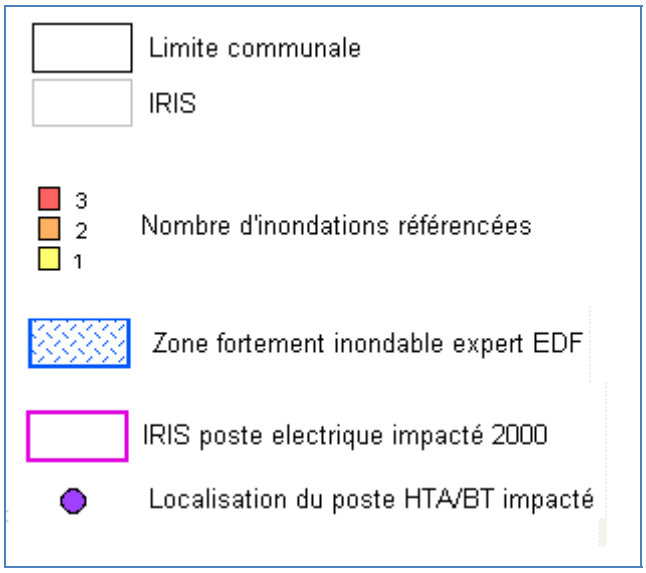
IRIS poste electrique impacté 2000

Localisation postes HTA/BT impactés

Croisement entre les IRIS inondés recensés dans la presse au cours d'un ou plusieurs évènements (données source tableau Martine Chalvet), avec les buffers à 30 mètres des voies inondables (données sources Mairie de Marseille) et les dommages aux postes électriques HTA/BT recensés dans les bases de données pour l'évènement de 2000 (données sources archives AMO, ERDF).

Carte 46 : Les espaces de la mémoire du risque inondation : historique de presse (1951- 2003), voies inondables et dommages électriques (2000).





Carte 47 : Les zones en bordure de l'Huvaune et du Vieux Port d'après les espaces de la mémoire du risque inondation : historique de presse (1951 - 2003), voies inondables, dires d'expert EDF et dommages électriques (2000).

Tableau 5 : Vulnérabilité relative des équipements électriques au risque inondation en fonction des espaces de la mémoire du risque considéré.

		VALEUR EN NOMBRE DE POSTES ELECTRIQUES					VALEUR EN % DU TOTAL DE POSTE DE MEME TYPE					POSTES HTA/BT IMPACTES en 2000	
	POSTES ELECTRIQUES IMPLANTES ZONES DE TYPE :	source HTB / HTA	Clients 20kV	HTA/BT distribution publique	Postes mixtes	TOTAL	source HTB / HTA	clients 20kV	HTA/BT distrib publique	Postes mixtes	TOTAL	Nombre de postes	Part poste impacté
	Commune de Marseille	8	712	3359	208	**4279**	100	100	100	100	**100**	7	100
Espace de la mémoire du risque aménagement Ville de Marseille (PLU)	Zones inondables inconstructibles PLU	0	0	9	0	**9**	0,0	0,0	0,3	0,0	**0,2**	0	0,0
	Zones inondables constructibles préconisation forte PLU	1	8	46	4	**59**	12,5	1,1	1,4	1,9	**1,4**	0	0,0
	Zones inondables constructibles préconisation normale PLU	0	68	155	12	**235**	0,0	9,6	4,6	5,8	**5,5**	0	0,0
	Ensemble des zones inondables PLU	1	76	210	16	**303**	12,5	10,7	6,3	7,7	**7,1**	0	0,0
Espace de la mémoire du risque historique presse locale	IRIS inondable cité pour deux évènements ou plus	0	52	163	14	**229**	0,0	7,3	4,9	6,7	**5,4**	0	0,0
	IRIS inondable cité pour un évènement ou plus	1	97	351	22	**471**	12,5	13,6	10,4	10,6	**11,0**	0	0,0
Espace de la mémoire Ville de Marseille	Voies inondables buffer 20 mètres	0	88	520	30	**638**	0,0	12,4	15,5	14,4	**14,9**	4	57,1
	Voies inondables buffer 30 mètres	1	152	789	48	**990**	12,5	21,3	23,5	23,1	**23,1**	5	71,4

Le tableau 5 fait bien ressortir la diversité des périmètres inondables et la vulnérabilité variable des équipements électriques en fonction du territoire de risque qu'on va considérer comme référence. Les buffers des voies inondables correspondent aux périmètres pour lesquels la vulnérabilité du réseau électrique semble la plus importante avec plus de 23% des équipements concernés. Il s'agit également du seul périmètre inondable pour lequel les postes électriques inondés en 2000, d'après les informations fournies par ERDF, peuvent être correctement identifiés (bien que de manière non exhaustive). Cette variabilité des espaces du risque ne nous paraît pas anodine dans la mesure où elle témoigne de l'incertitude qui entoure la construction des périmètres inondables, qui sont, en quelque sorte, une forme de représentation de la mémoire.

5.2.2.2. Quelle connaissance des périmètres inondables et quelle mémoire des inondations passées pour les gestionnaires électriques ?

Nous avons souligné dans la partie précédente, les difficultés rencontrées par le gestionnaire du réseau électrique avec l'utilisation de zones inondables fournies par la mairie de Marseille. Toutefois, cette difficulté qui est avant tout d'ordre technique ne saurait être interprétée comme une méconnaissance pure et simple des périmètres de zones inondables. Nous avons questionné plusieurs responsables de services et leur avons demandé de nous signaler les secteurs qui étaient selon eux les plus fréquemment inondés ou pour lesquels les inondations créaient le plus de dommages. Il apparaît que les secteurs désignés correspondent bien à ceux qui ressortent de nos propres analyses terrain. Ainsi, le secteur de la Cité de la Gardanne qui ressort clairement comme un espace à enjeu d'après les résultats de l'enquête, nous avait été indiqué dès notre première rencontre par Jean Luc Isnard, responsable du service cartographie d'ERDF Marseille, qui nous avait précisé que cette zone était restée non alimentée en électricité pendant une période importante suite à la crue de l'Huveaune le 17 janvier 1978 et qu'elle avait dû être évacuée lors de l'inondation de début décembre 2003. Un autre exemple concerne le poste source Rabatau, en bordure du Jarret qui a été clairement identifié comme un poste vulnérable à l'inondation, sans qu'on ait fait état de retour d'expérience, ni de bases de données spécifiques aux inondations passées.

Ainsi, compte tenu des informations dont nous avons pu disposer à ce jour, il semblerait que la connaissance et la mémoire des inondations pour le gestionnaire électrique marseillais tiennent davantage à l'expérience individuelle de plusieurs agents qu'à un véritable construit collectif formalisé autour d'une recherche d'opérationnalisation de la mémoire du risque. Aucune inondation n'a fait l'objet pour le gestionnaire du réseau électrique marseillais, d'un retour d'expérience, d'une base de données ou d'un quelconque archivage d'informations internes réalisé spécifiquement par rapport aux phénomènes d'inondations. Par exemple, pour les données demandées portant sur les postes électriques endommagés lors des inondations liées à la crue de l'Huveaune du 17 janvier 1978, aux orages du 19 septembre 2000 et ceux du 1er décembre 2003, des recherches spécifiques ont dû être effectuées par les services d'ERDF, alors qu'on aurait pu s'attendre à ce que cette collecte ait déjà été effectuée par le passé.

De plus, les résultats proposés mettaient en avant certaines défaillances dans la mémoire du gestionnaire, puisqu'aucune information sur les dommages de 1978 n'était disponible. Il

existe par ailleurs un décalage entre les dommages signalés dans les données historiques de presse et ceux transmis par ERDF. Bien que les chiffres portés dans la presse locale soient très variables et sujets à caution, les articles de presse qui relatent l'inondation du 19 septembre 2000 signalent 40 000 foyers coupés au plus fort de la crise, 3700 foyers encore privés à l'aube (du lendemain) dans les quartiers du centre ville et du 8ème arrondissement et 280 foyers en milieu d'après-midi. Ce nombre important de foyers privés d'électricité tranche singulièrement avec la mention faite par ERDF de seulement 7 postes de distribution endommagés, recensés lors de cette inondation. De la même manière, pour l'inondation de 2003, la presse fait référence à une dizaine de postes basse tension endommagés (6, 8, 10ème arrondissement), alors que ERDF ne dispose d'aucune trace de postes endommagés dans ses propres bases de données.

D'autre part, plusieurs de nos demandes de données concernant par exemple les secteurs où le nombre de clients coupés lors des trois évènements de référence déjà cités, n'ont pu faire l'objet de réponses favorables pour des motifs de confidentialité, mais aussi parce que ces demandes s'avéraient trop coûteuses en temps de recherche. Ainsi, peut-on penser que si l'électricien n'a pas réalisé de retours d'expériences sur les inondations jusqu'à présent, c'est bel et bien parce qu'il n'en ressent pas un intérêt majeur. En conséquence, notre première hypothèse, tablant sur un nombre important de retours d'expérience développés par les gestionnaires de réseaux électriques, compte tenu de la fréquence élevée des inondations dans la commune marseillaise et du caractère vital des réseaux de distribution électrique, doit être réfutée.

5.2.2.3. La mémoire du risque est-elle absente dans la stratégie de gestion des inondations des réseaux électriques marseillais ?

Cette absence de formalisation de la mémoire du risque conduit à nous interroger sur la gestion des inondations pour les réseaux électriques marseillais, en distinguant, des dispositifs de gestion du risque qui passent avant tout par des mesures de protection et de réduction de la fréquence des endommagements, par opposition à des dispositifs de gestion de crise qui consistent avant tout en une restauration de l'alimentation électrique, si celle-ci est amenée à s'interrompre du fait d'un endommagement matériel. En termes de gestion du risque, plusieurs mesures de protection nous ont été signalées, en vu de rendre « invulnérables » certains postes électriques dans la zone Michelet / Prado.

Ces changements de postes sont intervenus après les inondations de 2000 et concernent avant tout ce qu'ERDF appelle des postes trappes, c'est à dire des postes électriques implantés en dessous de la chaussée et accessibles à partir de trappes situées directement sur les trottoirs. De manière logique leur vulnérabilité à l'inondation et à l'ennoiement est plus importante que celle des postes situés au dessus du sol. Compte tenu de l'absence de mémoire formalisée sur les inondations soulignée dans la partie précédente, nous nous étions interrogés sur la manière dont s'était fait la sélection des postes qui allaient bénéficier de cette technique. A ce jour, les réponses données, nous laissent penser qu'aucune étude d'ensemble prenant en compte les inondations passées n'a été réalisée préalablement pour justifier le choix des secteurs à protéger prioritairement grâce à cette technique.

En termes de gestion de crise, ERDF dispose d'une expérience reconnue et des protocoles performants établis pour la plupart, à l'échelle nationale, qui permettent par exemple en théorie d'assurer une continuité de l'approvisionnement électrique pour certains secteurs à enjeux (plans de délestage et notions de clients prioritaires). De plus des dispositifs techniques tels que les organes manœuvrés par télécommande (OMT) permettent d'observer et de contrôler le réseau à distance afin de détecter des pannes éventuelles sur le réseau de distribution (bien que ces OMT ne concernent qu'environ un dixième des postes électriques).

Néanmoins, il est intéressant de noter que ces dispositifs de déclenchement de crise ne sont pas systématiques lors des inondations ; autrement dit, pour un même territoire et un même évènement, tout le monde ne vit pas forcement une crise. Ainsi, lors de l'inondation de décembre 2003, pour laquelle le Bataillon des Marins Pompiers de Marseille a mobilisé 600 hommes pour plus de 1700 interventions, pour laquelle 86 écoles sur les 460 que compte la ville avaient été fermées, la presse relève une dizaine de postes basse tension endommagés mais indique que « EDF considère ces évènements comme de simples incidents et n'a à aucun moment considéré la situation comme relevant de l'état de crise ».

D'un point de vue général, sur la place de la mémoire du risque dans la gestion des inondations, nous pouvons dire que l'expérience reconnue de l'électricien français associée à une forte confiance dans les technologies visant à rendre les postes électriques insubmersibles, conduit ERDF, malgré la vétusté reconnue des équipements électriques de certains quartiers, à ne pas contribuer à la construction et à la formalisation d'une mémoire collective ou « institutionnelle » sur le risque inondation à Marseille, ni même à véritablement intégrer et recourir à cette mémoire des inondations dans ses pratiques de gestion du risque ou de gestion de crise.

5.2.2.4. Mise en perspective avec un autre gestionnaire de réseaux urbains, l'exemple de la SERAM : de la construction à l'opérationnalisation de la mémoire

En dépit de plusieurs solutions techniques mises en place ou planifiées qui tendent à diminuer sa vulnérabilité, le caractère vétuste et sous-dimensionné des réseaux d'assainissement marseillais n'est pas réellement modifiable ; ainsi ces derniers débordent même pour des pluies non exceptionnelles comme ce fut le cas en 2000, en 2003 ou en 2008. La construction d'une mémoire du risque inondation depuis plus de 10 ans sous forme de « Rapport d'orages » et de base de données spatiales sur les dommages observés s'avère être à la fois un aveu de modestie face aux fortes pluies et un outil de connaissance mobilisable pour améliorer la gestion des inondations. Cette connaissance permet d'abord d'optimiser les stratégies de réduction du risque, en traitant prioritairement les équipements du réseau pour lesquels des dysfonctionnements ont été observés et mémorisés lors des évènements passés.

Ainsi, parmi les 193 points à enjeux identifiés lors des inondations depuis la mise en place de cette démarche de mémorisation, 50 équipements dont les dysfonctionnements étaient parmi les plus récurrents lors des épisodes pluvieux ont aujourd'hui fait l'objet d'aménagements et de corrections spécifiques. La mémoire du risque développée par l'exploitant du réseau d'assainissement optimise également la gestion de la crise, dans la mesure où dès le

dépassement d'un certain seuil d'alerte, des agents techniques sont postés à proximité des points de dysfonctionnements connus pour surveiller et intervenir le plus efficacement possible.

Comme on peut le noter dans la figure ci-dessous, alors que la formalisation de la mémoire des inondations est au centre de l'exploitation du réseau d'eau potable et d'évacuation des eaux, tant au niveau des stratégies et des pratiques de prévention du risque qu'au niveau des stratégies de gestion de crise, en revanche, elle n'intervient pas dans celle mise en œuvre par le gestionnaire du réseau électrique.

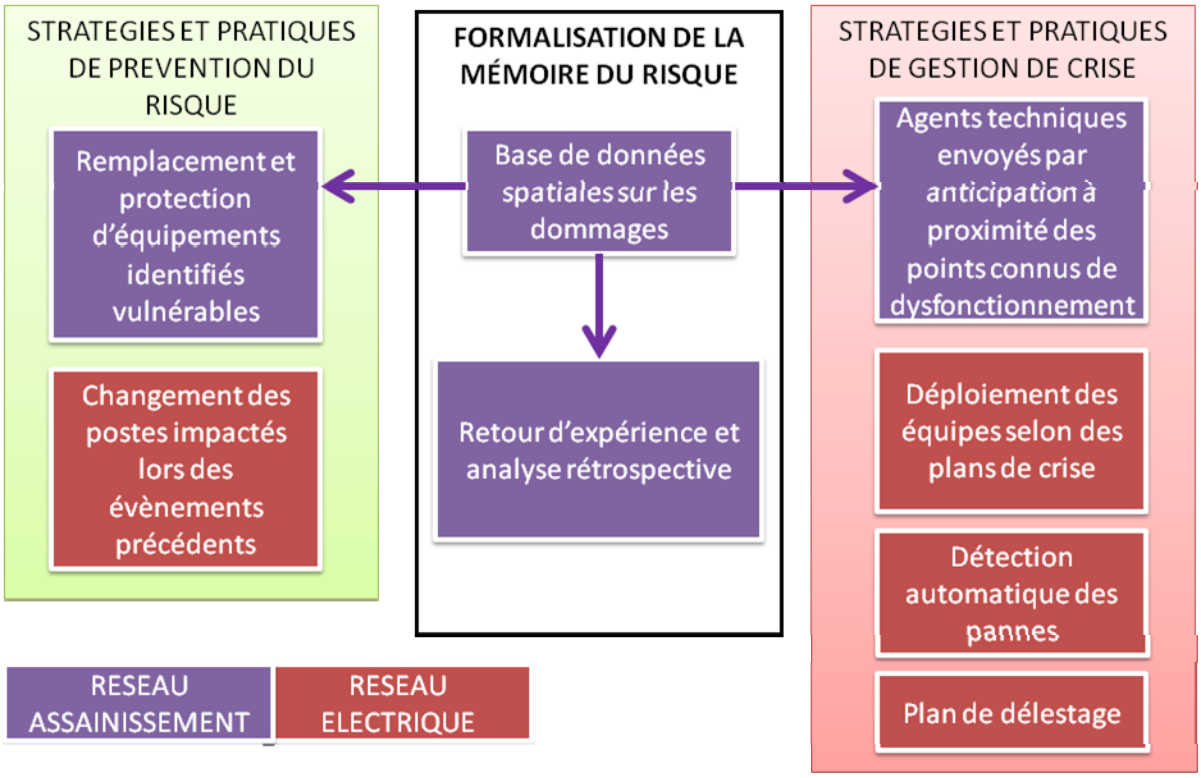


Figure 48 : Place de la mémoire du risque inondation dans la stratégie de gestion des deux exploitants des réseaux urbains face aux inondations.

CONCLUSION

Il ressort des analyses de ce chapitre, certains lieux récurrents dont le poste source de Rabatau, qui est à la fois raccordé à des enjeux de dépendance importants tout en étant le seul poste source potentiellement inondable d'après l'analyse de la seconde partie ou encore la Cité de la Gardanne qu'on retrouve à plusieurs reprises cités comme un lieu sensible aux inondations notamment en termes de continuité d'approvisionnement électrique. On comprend assez facilement au vu de l'incertitude décrite depuis le début de cette recherche, qu'à partir de la perte du poste source Rabatau par exemple, le déclenchement de plusieurs

types de systèmes de risques est envisageable (multi-potentialité) et notamment certaines trajectoires à enjeux présentées dans les cartes 30 à 33.

Dans le cadre de l'anticipation des espaces à enjeux et des systèmes de risques, la connaissance imparfaite de la répartition spatiale et de la nature des endommagements passés ainsi que de leur mémorisation (sur un plan rétrospectif), se combine à la connaissance imparfaite des interdépendances réseaux-territoires, et donc des trajectoires de diffusion possible des systèmes de risques (sur le plan de l'anticipation des impacts indirects). La détection des espaces à enjeux et des trajectoires de diffusions possibles des impacts indirects dans un contexte d'inondation pose donc un problème de combinaison d'imprécision et d'incertitude spatiale de nature tout à fait différente et des difficultés méthodologiques supplémentaires que celles liées à la gestion de l'imprécision et de l'incertitude à l'échelle de chacune des propriétés de SCReD.

Il nous paraît alors raisonnable de ne pas précipiter sa mise en œuvre qui implique sans doute davantage que la simple « superposition des couches », ou la fusion à l'échelle des grilles de susceptibilité, des indicateurs sur la criticité et la dépendance obtenus sur les nœuds de réseaux. Il serait dommage, de porter une grande attention et des efforts importants pour prendre en compte la complexité et l'incertitude de chacune des propriétés de SCReD, pour finalement considérer que leur combinaison n'engendre, en revanche, aucune difficulté en termes d'incertitude spatiale.

De plus, pour le cas des inondations marseillaises, en amont des traitements d'informations sur les dommages des inondations, la question de la précision spatiale a été assez peu prise en compte. Par exemple le rattachement des dommages à l'échelle des IRIS proposés dans les cartes 45 à 47 constitue, en termes de précision spatiale, une importante dégradation de la qualité de certaines informations ponctuelles. Ainsi, dans l'estimation de la variabilité spatiale de la susceptibilité, on serait amené à considérer pour le cas Marseillais, une information assez peu précise spatialement sur l'inondation, qui serait croisée avec des données ponctuelles sur la localisation des équipements électriques qui seraient revanche extrêmement précises (localisation d'un poste électrique).

Le « croisement » des différentes estimations de SCReD restera donc pour l'heure en l'état de perspective de recherche pour essentiellement deux raisons.

Comparativement au chapitre 4 où la prise en compte de l'incertitude et de l'imprécision dans la spatialisation des systèmes de risques restait secondaire voire absente, elles occupent une place plus importante dans la démarche menée sur la commune de Marseille tant dans l'estimation de la susceptibilité que dans l'estimation de la criticité et de la dépendance. Malgré cela, plusieurs techniques présentées en chapitre 3 (sur l'incertitude de la délimitation des bassins de dépendance ou sur la spatialisation des données hétérogènes et imprécises à partir des grilles imbriquées) sont encore à tester. Elles feront l'objet du chapitre 6, consacré à l'analyse rétrospective de la coupure électrique dans la métropole de Barcelone du 23 au 25 juillet 2007.

CHAPITRE 6 : SPATIALITÉ ET TEMPORALITÉ DES RISQUES EN RÉSEAUX DANS LES SYSTÈMES URBAINS - ANALYSE RÉTROSPECTIVE DE LA COUPURE ÉLECTRIQUE DANS LA MÉTROPOLE DE BARCELONE, 23- 25 JUILLET 2007

Introduction

La spatialisation, la connaissance des interdépendances territoires–réseaux–populations, en période de perturbation, et la recherche d'éventuelles règles d'organisation spatiales permettant de comprendre et d'anticiper ces évènements à risques, restent des pistes de recherches assez peu explorées. Dans cette perspective, nous avons fait le choix d'analyser rétrospectivement la spatialité et la temporalité des risques en réseaux dans les systèmes urbains, en nous attachant à décrire, comprendre et spatialiser les enjeux de la coupure d'électricité dans la commune de Barcelone, durant l'été 2007.

Si cet évènement a fait l'objet de retours d'expériences et de rapports techniques détaillés d'un point de vue électrique (CNE, 2007, Generalitat de Catalunya, 2007), ces études ne comportent pas de cartographies ni d'informations spatiales sur la délimitation des territoires affectés, les autres réseaux impactés, et plus largement les impacts sociétaux de la coupure électrique. A l'opposé, notre démarche est de ne pas considérer la coupure électrique comme un simple incident technique mais comme une période d'instabilité du système urbain au cours de laquelle des différenciations spatiales potentiellement porteuses de situations à risques vont apparaître, se diffuser, se combiner à d'autres, se résorber pour revenir à un état homogène du système spatial. Il s'agit, en quelque sorte, de recherche de règles et d'ordres spatiaux au cours d'un processus désorganisant.

Compte tenu de l'absence de données spatiales fines et exhaustives sur les périmètres de coupures électriques dans les rapports officiels, reconstruire *a posteriori* la dynamique spatiale de ces évènements impose d'avoir recours à des sources d'informations hétérogènes, dont la fiabilité et la précision spatiale peuvent être fortement variables (presse, témoignages localisés, données quantitatives, forum internet). La fusion de données hétérogènes nous conduit à mettre en œuvre une spatialisation de l'information particulière, incluant différents niveaux de grilles imbriquées auxquelles les informations vont être rattachées en fonction de leur précision spatiale (Dutozia, 2009) et prenant en compte les localisateurs et les quantificateurs flous parfois utilisés dans les récits verbaux décrivant les lieux impactés.

Dans un second temps, ces résultats « empiriques » sur les sous-espaces affectés par la coupure électrique sont comparés à ceux obtenus à partir de modélisations géométriques des structures spatiales qui découlent de la répartition des postes électriques. Le test des méthodes présentées à la section 3.3.3. du chapitre 3, démontre une plus grande similarité avec les structures spatiales obtenues par la méthode des diagrammes de Voronoï pondérés de manière

multiplicative (DVPM) qu'avec les tessellations de Voronoï standard (DV). L'intégration de la composante temporelle vient confirmer cette observation puisque les simulations à partir des DVPM permettent de reproduire l'évolution du nombre de foyers coupés au cours des 53 heures de coupures, avec une erreur moyenne inférieure à 7% contre une erreur moyenne supérieure à 20% pour celles menées à partir des DV.

Enfin, après avoir simulé la dynamique spatiale de la coupure électrique entre le début et la fin de la crise, les impacts indirects de cette coupure seront analysés en distinguant trois périodes, d'abord les impacts indirects observés durant la coupure électrique, puis ceux apparaissant peu de temps après la crise et enfin, les effets indirects de l'évènement sur l'organisation du territoire électrique barcelonais à long terme.

6.1. D'UN INCIDENT TECHNIQUE, PONCTUEL ET MINUTÉ A UN ÉVÈNEMENT URBAIN, COMPLEXE, DIFFUS DANS L'ESPACE – TEMPS

6.1.1 Barcelone, 23 juillet 2007, 10h53, la minute de déclenchement du système de défaillances

Si rétrospectivement certains mécanismes d'aggravation de cette crise restent empreints d'incertitude, l'évènement à l'origine de son déclenchement est identifié, localisé et daté avec précision. La rupture d'une section de la ligne de distribution électrique 110kV à l'entrée du poste de transformation de Collblanc, le 23 juillet 2007 à 10 heures 53 minutes et 12 secondes. Cette rupture de ligne, liée à un manque de maintenance (Generalitat de Catalunya, 2007) est reconnue comme l'évènement dont découlent les défaillances en cascade qui vont affecter les réseaux et le territoire de Barcelone. Toutefois, bien qu'elles possèdent une origine commune et soient quasi-simultanées, il convient de distinguer deux chaînes de défaillances dans la diffusion de la panne électrique.

L'impact immédiat de cette rupture de ligne aurait été beaucoup plus limité dans le temps et l'espace si dans sa chute, la ligne n'était pas entrée en contact avec le poste de transformation 220kV de Collblanc, conduisant à sa perte d'approvisionnement électrique puis, 3 secondes plus tard avec la ligne Collblanc-Urgel, provoquant un court-circuit responsable de la perte d'approvisionnement pour les postes 220kV de Urgel et de Maragal (carte 48). Il est 10h53m15s, en 3 secondes la coupure électrique s'est diffusée et a atteint son « pic » avec 323 337 foyers coupés (figure 49). Moins de 15 secondes plus tard, un incendie est détecté dans le poste de transformation électrique 220kV de Maragal et détruit totalement ce dernier. Cet incendie n'a aucune incidence directe sur la coupure électrique dans le sens où il ne conduit ni à une aggravation du pic de foyers coupés (le pic reste le même que 12 secondes auparavant) ni à de nouvelles propagations dans l'espace.

Carte 48 : L'organisation de l'approvisionnement électrique de Barcelone par le réseau de transport 220kv en vert (géré par la société Red Eléctrica Española REE) et le réseau 110 kV en bleu (géré par Endesa).

Par contre, nous verrons en section 3 que l'effet de l'incendie sur le système de risques est essentiellement différé et se traduit par une prolongation de la crise dans le temps. Si plusieurs hypothèses ont été explorées, la cause primordiale de cet incendie semble être le mauvais état du poste de Maragal, c'est-à-dire une défaillance latente qui aurait été davantage révélée que déclenchée par la chute de la ligne et aurait permis la création de l'arc électrique à l'origine de l'incendie. Alors que l'impact initial n'aurait concerné que les zones desservies par le poste de Collblanc et que l'approvisionnement électrique aurait été restauré en l'espace d'une ou deux heures, ces défaillances électriques en cascade vont plonger en quelques secondes une des plus grandes métropoles européennes dans un état d'instabilité et de dysfonctionnement pour une durée allant de quelques minutes, à plusieurs heures, voire à plusieurs jours selon les endroits. Comme souligné dans le rapport du Comité National de l'Energie espagnol et dans celui du gouvernement catalan (CNE, 2007, Generalitat de Catalunya, 2007), les conséquences importantes d'une perturbation initiale que l'on peut qualifier de mineure mettent ici en lumière le manque d'entretien du réseau de transport et de distribution électrique.

En effet, d'une part, certaines avaries auraient pu être évitées si l'état du réseau avait été satisfaisant, d'autre part, les capacités de compensation entre les postes électriques auraient du permettre de maintenir l'approvisionnement électrique. Pour ces raisons, les gestionnaires de réseaux ont été jugés co-responsables de la panne ; ils ont été condamnés à une amende 21 millions d'euros et à l'indemnisation des clients affectés par la coupure. De plus, plusieurs dysfonctionnements de mécanismes de protection ont contribué à l'aggravation de la coupure

électrique (propagation dans l'espace et prolongation dans le temps), ce dernier élément peut paraître paradoxal mais est en fait assez courant, et souligné dans les travaux des spécialistes : "malfunctions in the protection system are an important contributing factor in major blackouts. Hidden failures in the protection system cause intact equipment to be unnecessarily disconnected following a fault on a neighboring component." (Dobson, *al*., 2001). A l'heure où l'on s'interroge de plus en plus sur la vulnérabilité des infrastructures critiques face aux évènements naturels extrêmes et à la réaction du système territorial soumis à l'endommagement simultané de plusieurs composantes des systèmes de réseaux, le fait qu'une perturbation mineure et unique se révèle aussi critique est un signe inquiétant de vulnérabilité et un manque de résilience du système électrique.

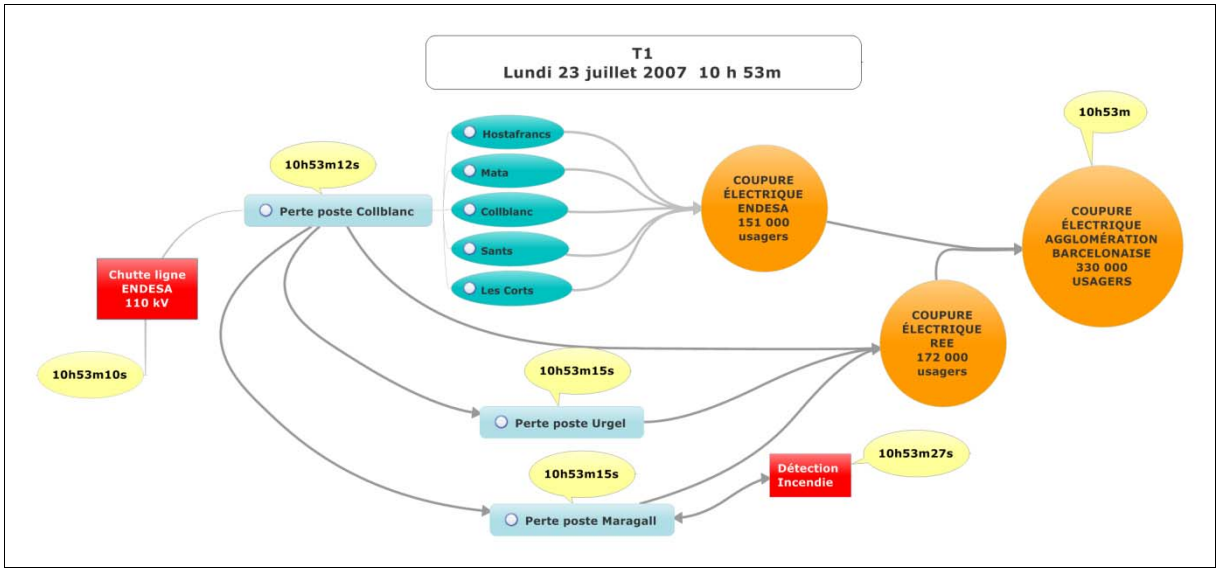


Figure 49 : Déroulement de la minute de déclenchement du système de risques.

Pour le sous-système [déclenchement de la coupure électrique], la temporalité induite par l'environnement technique est de l'ordre de la milliseconde et de la seconde, c'est pourquoi les retours d'expériences sur les grandes pannes électriques contiennent en général d'impressionnantes listes de défaillances électriques en cascade, chronométrées avec une très grande précision. En plusieurs dizaines de pages, ces rapports s'attachent à reconstituer *a posteriori* le fonctionnement du système électrique pendant les une ou deux minutes de perturbations initiales. L'intérêt et la pertinence du regard géographique pour analyser ces dynamiques très brèves ne vont pas de soi et méritent quelques éléments de précision. En effet, elles excluent *a priori* les dynamiques environnementales, sociétales et territoriales classiques dont la réalisation nécessite des temporalités plus longues. Pourtant, elles produisent des différenciations spatiales temporaires, parfois extrêmement brèves, dont l'analyse spatiale et rétrospective est porteuse de compréhension pour le fonctionnement des interactions territoires – réseaux (chapitre 2).

De plus, la connaissance du système de déclenchement pourrait permettre d'expliquer certains aspects de l'évolution de la crise et de la restauration du système (ce qui signifie qu'il existe des liens entre le système de déclenchement et le système de restauration du système électrique, et donc entre les dynamiques de diffusion spatiale observées à l'échelle des

secondes et celles de résorption spatiale observées à l'échelle des heures et des jours dans la restauration du système.)

6.1.2 Interdépendance des systèmes de réseaux et défaillances en cascade

La perturbation du réseau électrique se situe en amont du système de risques ; toutefois, la relative gravité des évènements de Barcelone réside aussi dans la manière dont le territoire (espace-réseau-société) réagit à ce dysfonctionnement électrique, rend possible la réalisation d'effets dominos et transforme un incident technique en évènement complexe et potentiellement à risques. La diversité des impacts indirects s'explique par l'interdépendance des systèmes de réseaux et en particulier leurs dépendances au réseau électrique.

Dans le cas de Barcelone, les dysfonctionnements provoqués directement par la coupure électrique portent essentiellement sur trois composantes du système urbain (figure 50).

- La mobilité : les dysfonctionnements touchent plusieurs lignes des réseaux ferroviaires, des réseaux de métro et la majorité des feux tricolores de circulation routière. La fermeture de plusieurs rues pour permettre le passage de lignes électriques de secours complique encore davantage les déplacements des barcelonais et des services de secours.

- Les communications : la panne électrique affecte un nœud central du réseau de téléphonie mobile, provoquant la perte temporaire de 200 stations de bases et de la couverture GSM dans la majorité de la ville.

- La santé, la sécurité et le bien être des populations : la perte de l'alimentation électrique touche une grande partie des hôpitaux de la ville et contraint au report de plusieurs dizaines d'opérations chirurgicales, l'éclairage public est absent des artères principales de la ville au premier soir de la crise et les populations découvrent les nuisances sonores dues à l'installation des groupes électrogènes de secours. La persistance de la coupure électrique et du « désordre urbain » qui l'accompagne, conduisent d'ailleurs à des « caceroladas », manifestations pacifiques au cours desquelles certains habitants défilent dans la rue en frappant des casseroles, à partir du second jour de panne (montrant que l'acceptabilité des coupures électriques dans les grandes aires urbaines n'est peut être pas aussi importante que l'on pourrait le penser.)

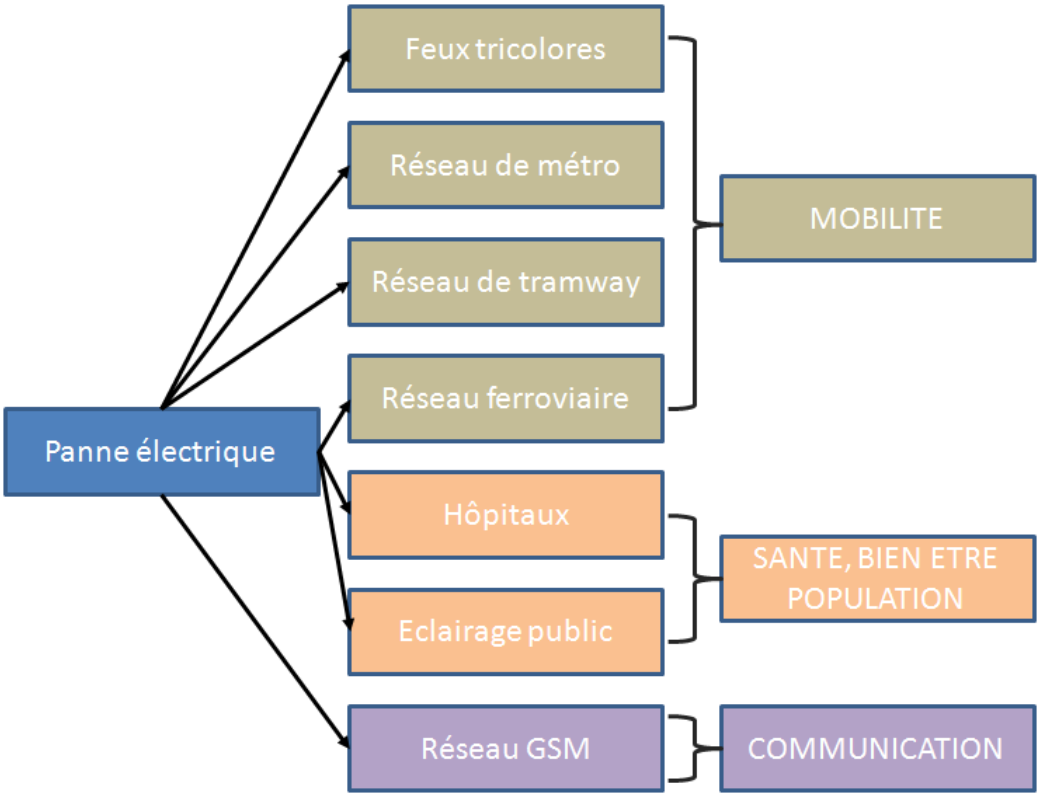


Figure 50 : Interdépendances des réseaux et effets dominos dans la perturbation du système urbain barcelonais, juillet 2007.

6.1.3 Instabilité du système urbain et processus de différenciation spatiale

En période de stabilité, il n'y a pas de différenciation dans l'état d'approvisionnement électrique des différents sous-espaces du système, la structuration spatiale du réseau électrique n'est pas visible, dans le sens où elle ne produit pas de différenciation spatiale. En période de perturbation, cette structuration spatiale invisible est susceptible d'apparaître partiellement à travers la différenciation entre zone coupée et zone alimentée. Au déclenchement du système de risques, correspond donc un processus de différenciation spatiale, le passage d'un état homogène du point de vue de l'approvisionnement électrique, à un état hétérogène. Ce premier changement d'état en conditionne d'autres, c'est-à-dire que dans le système de risques, l'effet domino se déclenche dans un sous-espace où il y a eu un changement d'état et peut avoir un impact sur tout ou partie d'un sous-espace affecté ou non par le changement d'état initial. L'organisation spatiale des systèmes de risques complexes peut donc être perçue comme le résultat des structurations spatiales emboîtées des différents réseaux. L'objet de la section suivante sera de produire une cartographie de la coupure électrique de Barcelone malgré l'absence de données fiables et exhaustives sur l'état d'approvisionnement électrique des territoires.

Les évènements de Barcelone correspondent à un système de risques particulier dans le sens où l'aléa électrique est déclencheur des effets dominos et se place donc en amont du système de risques ; dans les autres cas envisagés dans les chapitres précédents, les défaillances et

dommages du et dus au réseau électrique sont déclenchés par un évènement d'origine naturelle (inondation, tempête, ou incendie). Si l'on considère les réseaux techniques comme un sous-système du système territorial, alors on peut dire que le cas barcelonais montre que le territoire peut produire ses propres instabilités, qu'une perturbation mineure peut suffire à provoquer une cascade d'effets. Les risques à grande échelle issus de défaillances en cascades ne se posent donc pas uniquement comme un problème d'adaptation du système technique à son environnement extérieur, mais également comme un problème de dépendance et de stabilité du fonctionnement du système territorial soumis à une perturbation mineure du système technique.

D'autre part, le fait que cette perturbation initiale soit mineure, peut nous laisser penser qu'il sera plus facile de tirer des enseignements sur le fonctionnement des interdépendances réseaux-territoires. Le scénario reconstruit spatialement dans cette contribution repose sur un endommagement initial unique et ponctuel dans le réseau électrique, alors que dans le cas de dommages naturels, c'est la combinaison parfois simultanée entre plusieurs dommages au réseau électrique dont il faut étudier les combinaisons d'impacts territoriaux. Autrement dit, malgré la diversité des impacts observés, l'incertitude sur certains processus critiques dans le déroulement de la crise ou encore la difficulté à reproduire sa dynamique spatiale, l'Apagón (la panne électrique) de Barcelone reste un système de risques relativement simple.

6.2. CARTOGRAPHIE DE LA COUPURE ÉLECTRIQUE BARCELONAISE DU 23 JUILLET 2007 ET MÉTHODE DE FUSION DE DONNÉES MULTI - SOURCES ET IMPRÉCISES

6.2.1. Construction de la base de données @PAGoN sur la panne électrique de la métropole Barcelonaise

Notre premier objectif peut être qualifié de statique, il s'agit de connaître l'ensemble des espaces affectés par la coupure électrique quelle que soit la durée de l'absence d'approvisionnement électrique. L'absence de cartographie et de données exhaustives sur les espaces affectés par la coupure nous conduit à rechercher « partout », les données localisées qui contiennent une information partielle sur la coupure quels que soient leur échelle, leur source ou le moment de publication de l'information. L'ensemble de ces informations est rassemblé dans une base données spatialisées et temporalisées regroupant environ 300 informations citées dans la presse, des rapports officiels ou des témoignages d'habitants barcelonais issus de forums de discussions internet. Les témoignages décrivant un retour de l'électricité dans un lieu donné ont également été intégrés dans la base de données en partant de l'idée que là où l'on note un retour de l'électricité au temps t, l'électricité était absence entre 10h53 et le temps t.

La base de données @PAGON (figure 51) comprend quatre thématiques : la localisation des coupures électriques, la localisation des impacts indirects associés à cette coupure, l'évolution de la population coupée et l'évolution de l'état de la restauration des différents postes

électriques de Barcelone. La figure 4 résume les différents types d'informations utilisées pour construire la base de données @PAGON et la structuration principale de cette dernière. Pour le moment nous nous intéresserons uniquement à la construction et au traitement de la base de données SIG 1 sur les territoires affectés par une rupture d'approvisionnement électrique. Les informations temporelles sur l'évolution des pannes, et les informations spatiotemporelles sur les dommages indirects n'apparaitront que dans la seconde partie de ce chapitre.

Parmi les sources disponibles, en dehors des références habituelles aux informations parues dans la presse, et des retours d'expériences plus orientés sur la dimension technique de l'évènement, nous avons également pu nous appuyer sur plusieurs témoignages recensés essentiellement sur internet, et plus spécifiquement dans les rubriques de commentaires associés aux articles de presse sur cette panne. On retrouve en effet dans plusieurs de ces témoignages, des informations plus ou moins précises (spatialement, temporellement et factuellement) sur l'état de l'approvisionnement électrique de la commune.

Figure 51 : Données multi-sources intégrées dans la base de données @PAGON.

La vectorisation des couches SIG est réalisée d'après le protocole suivant :

- Les informations indiquant une coupure en fonction d'un nom de communes, de districts ou de quartiers (échelles administratives, hiérarchiques et concordantes) sont spatialisées à partir du logiciel MapInfo (carte 50) en s'appuyant sur les périmètres administratifs transmis gracieusement par l'Institut Cartographique de Catalogne (ICC).

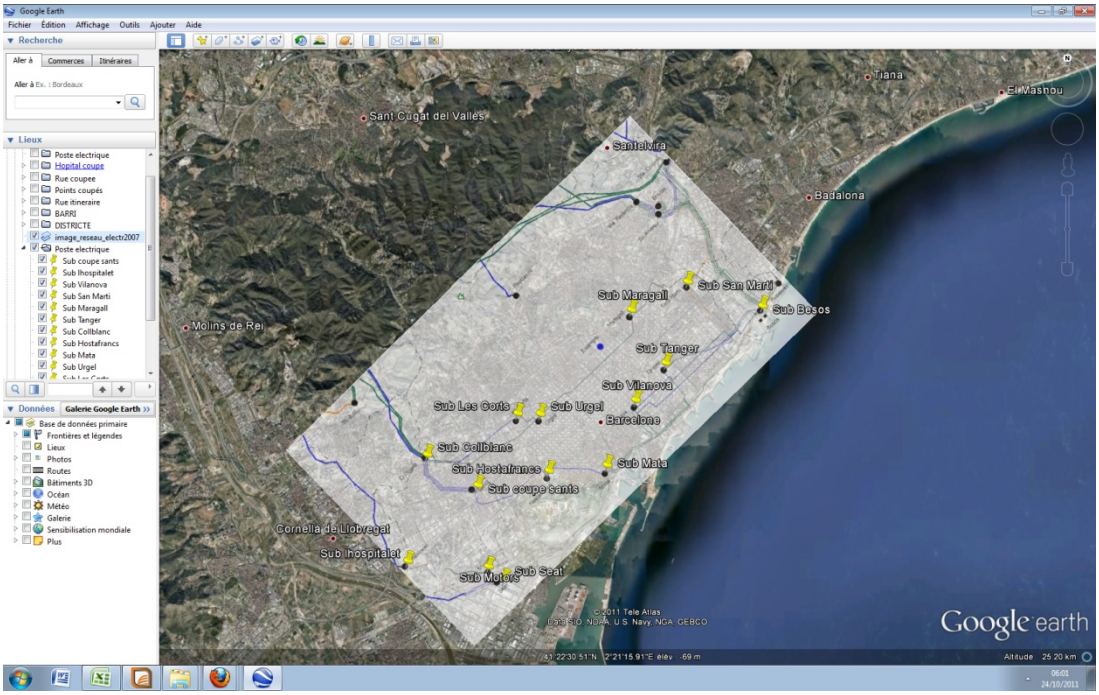
- Les témoignages citant une coupure dans un lieu précis, un dommage d'un poste électrique ou un nom de rue sont spatialisés à partir de Google Earth (carte 49), une image aérienne également fournie par l'ICC et la base de données voirie de Télé Atlas sur la région catalane.

Nous obtenons ainsi sept couches d'informations qui contiennent une information qualitative binaire sur la présence ou l'absence de la coupure électrique dans un sous-espace donné. On peut les hiérarchiser en fonction de trois niveaux de précision spatiale :

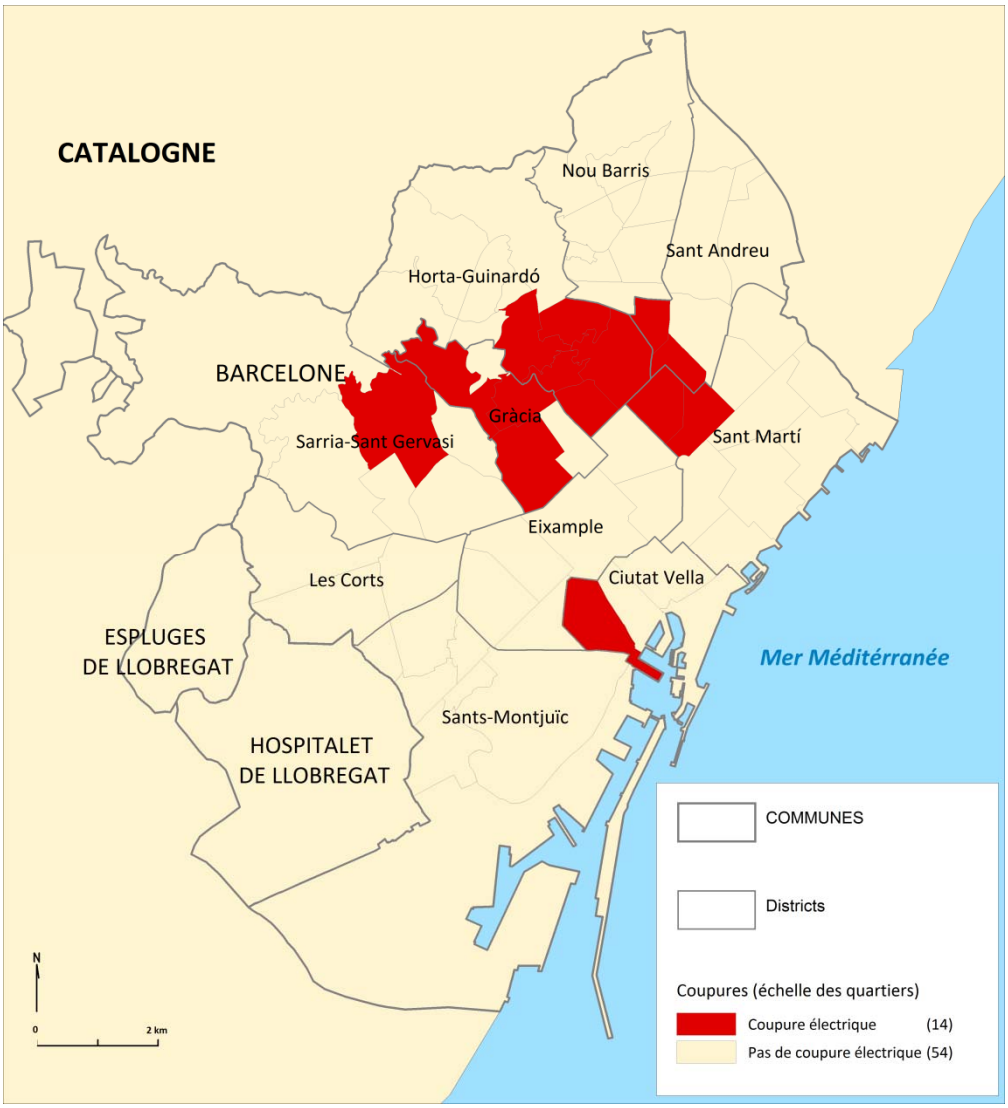
- Précision faible : les informations au niveau des communes (couche 1), des districts (couche 2) et des routes supérieures à 1 km (couche 4a) ; elles ont tendance à généraliser le périmètre de la coupure (par exemple, un titre de journal qui indique « une coupure électrique à Barcelone »).

- Précision moyenne : les informations au niveau des quartiers (couches 3) et des routes de longueur inférieure à 1 km (couche 4b)

- Précision forte : les témoignages ponctuels (couche 5) et les informations sur les hôpitaux affectés par les coupures électriques (couche 6)



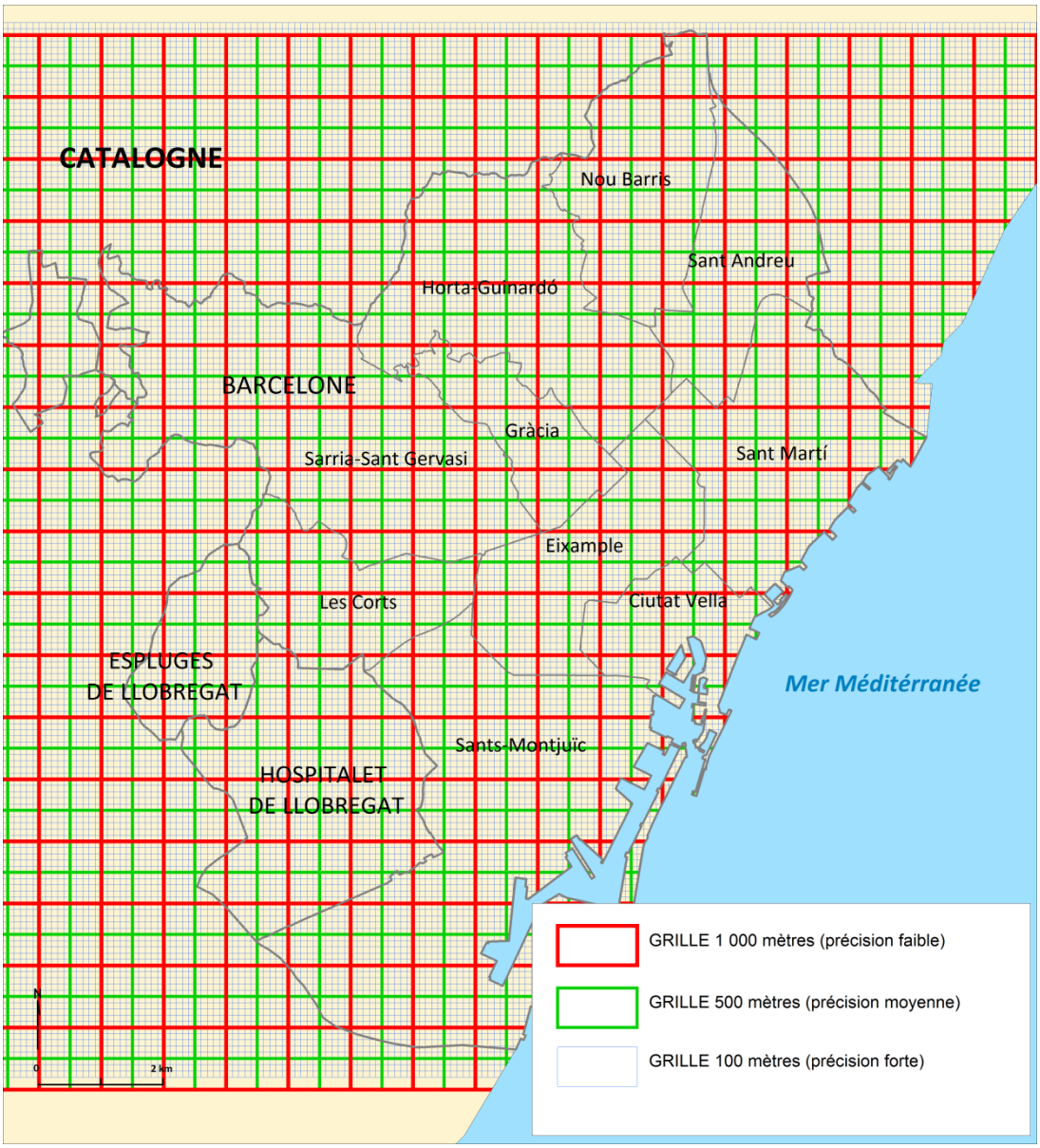
Carte 49 : Vectorisation d'informations spatiales précises de la BD @Pagon dans l'environnement Google Earth.



Carte 50 : Vectorisation de la couche 3 sur la présence de coupure électrique à l'échelle des quartiers de l'agglomération de Barcelone.

6.2.2. Transfert des bases de données SIG dans un carroyage multi niveau et méthode de fusion des informations

L'étape suivante consiste à transférer et fusionner les informations des différentes couches d'informations. La variabilité des niveaux de précision spatiale des données nous conduit à rattacher chaque information sur une situation localisée à un seul et unique niveau de granulométrie spécifiquement prédéfini. Au total, trois niveaux de granulométries ordonnés par taille croissante sont pris en compte sous forme d'emboîtements successifs de maillages carrés de 100 mètres (34 000 cellules), 500 mètres (1360 cellules) et 1000 mètres de côté (340 cellules) (carte 51). Les données de précision faible sont rattachées à la maille de 1000 mètres, celles de précision moyenne aux mailles de 500 mètres et celles de forte précision aux mailles de 100 mètres. Les trois maillages combinent l'ensemble de l'information sur la localisation des coupures électriques.



Carte 51 : Construction du carroyage multi niveau en fonction des trois niveaux de précision spatiale.

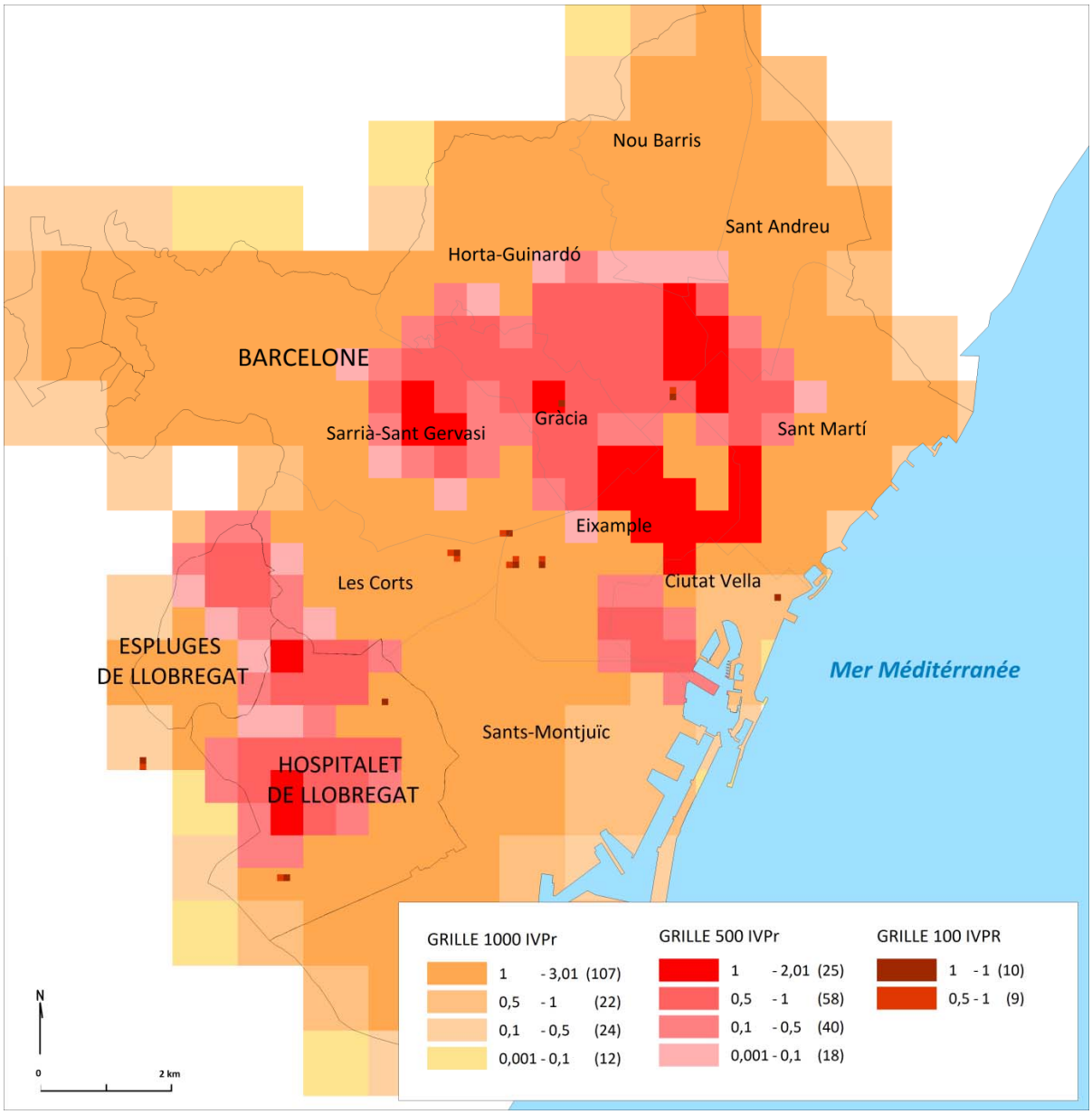
Ainsi, une information de mauvaise précision spatiale comme l'on peut en trouver dans la presse, par exemple « les communes de Barcelone, Espluges de Llobregat et Hospitalet de Llobregat n'ont plus d'électricité », sera affectée à un maillage de 1000 mètres de côté. La part de surface occupée dans chacune des cellules de 1000 mètres par le périmètre à risque approximativement délimité est ensuite calculée de manière à obtenir une valeur nécessairement comprise entre 0 et 1. Par exemple, les coupures électriques repérées à l'échelle des quartiers et représentées en carte 50 correspondent à une précision spatiale moyenne et sont donc transférées dans un maillage de 500 mètres de côté. Le transfert dans le carroyage est successivement réalisé sur les sept couches d'informations spatialisées, de manière à obtenir sept maillages contenant un indice de couverture des mailles (ICV) correspondant à la part de surface des cellules contenant un périmètre affecté par une coupure électrique.

Les indices vont de 0 (la cellule n'est pas superposée à un périmètre de coupure électrique) à 1 (100% de la surface d'une cellule est superposée à un périmètre de risque). A partir de là, différentes règles ont été testées, pour fusionner les différents maillages.

Dans la méthode 1 (carte 52), les informations appartenant à un maillage de même niveau de granulométrie sont d'abord sommées ; les informations sont donc rassemblées en fonction de leur niveau de précision spatiale, le maillage précis (100m) correspond à un indice compris entre 0 et 2 puisqu'il combine deux couches d'informations (celle sur les témoignages précis et celle sur les hôpitaux affectés par la coupure électrique), le maillage de précision intermédiaire (500m), un indice compris entre 0 et 2, et le maillage imprécis, un indice compris entre 0 et 3. Chaque niveau de grille synthétise l'information d'un niveau de précision. La méthode 1 que nous avons qualifiée de géométrique, consiste en une superposition des 3 grilles ainsi obtenues. Pour chacune des grilles, nous ne faisons apparaître que les cellules supérieures à 0, c'est-à-dire, celles pour lesquelles une coupure est déclarée ; la maille 1000 est placée en premier, puis celle de 500 et enfin celle 100 de telle sorte que l'information précise prime et remplace par superposition l'information dont la précision spatiale lui est inférieure. La méthode 1 s'apparente plus à une méthode d'affichage cartographique ordonné qu'une méthode de fusion *stricto sensu*.

Dans la méthode 2 (carte 53 à 55), l'objectif est de fusionner les différents niveaux de granulométrie pour obtenir l'ensemble de l'information dans une seule et unique grille. Si la méthode de fusion 1 pouvait être qualifiée de superposition géométrique de l'information, la méthode de fusion 2 est essentiellement algébrique et utilise les indices de couverture des mailles (ICV) des 7 grilles initiales. Par exemple, pour fusionner l'ensemble des informations dans la maille de 100 mètres, les ICV des mailles de 500 vont être divisés par 25 et reportés aux 25 cellules de 100 mètres imbriquées dans la maille de 500. Les ICV des mailles de 1000, divisés par 100 et reportés aux 100 cellules de 100 mètres imbriquées dans la maille de 1000. Ainsi d'après la méthode proposée, une valeur initiale de 1 à l'échelle de 1000, correspond à une valeur de 0.25 à l'échelle de 500 et de 0.01 à l'échelle de 100, une valeur initiale de 1 à l'échelle de 100 correspond à une valeur de 0.04 à l'échelle de 500 et de 0.01 à l'échelle de 1000 et une valeur de 1 à l'échelle de 500 correspond à 0.25 à l'échelle de 1000 et une valeur de 0.04 à l'échelle de 100.

A partir de cette méthode de report d'indice proportionnellement à la taille de sa maille, nous avons fusionné l'ensemble des informations dans la maille de 1000, dans la maille de 500 et dans la maille de 100. Les traitements liés aux grilles et aux fusions de grilles ont été créés à partir du langage informatique *Structured Query Language (SQL)*. En effet, le caractère très particulier des techniques que nous souhaitions mettre en œuvre ne nous permettait pas de faire appel à des outils préconstruits dédiés aux traitements d'informations raster (Vertical Mapper dans l'environnement MapInfo ou SpatialAnalyst dans ArcGis). Ce choix contraint est aussi l'occasion de conserver davantage de liberté et de contrôle dans la construction et la mise en œuvre de la méthode ; de plus, il répond au souci de placer l'outil technique en réponse à la formalisation théorique et méthodologique, alors qu'un outil entièrement préconstruit aurait pu être une contrainte dans cette étape de formalisation.



Carte 52 : Estimation des sous-espaces affectés par la coupure électrique de Barcelone. Résultats obtenus avec la méthode de fusion 1 par superposition géométrique des maillages 1000, 500 et 100.

L'interprétation d'une cartographie en partie construite sur des informations de faible précision spatiale n'est pas évidente dans la mesure où il arrive que persiste une part d'incertitude sur l'état de certains sous-espaces. De plus, il est difficile d'établir un seuil précis à partir duquel l'ICV indique avec certitude une coupure électrique, d'autant plus que selon la méthode de fusion utilisée, les valeurs maximales et les paramètres statistiques de la distribution des ICV vont évoluer (c'est d'ailleurs pourquoi nous utiliserons différents seuils de discrétisations en fonction des méthodes et des niveaux de granulométrie utilisés dans la fusion des données).

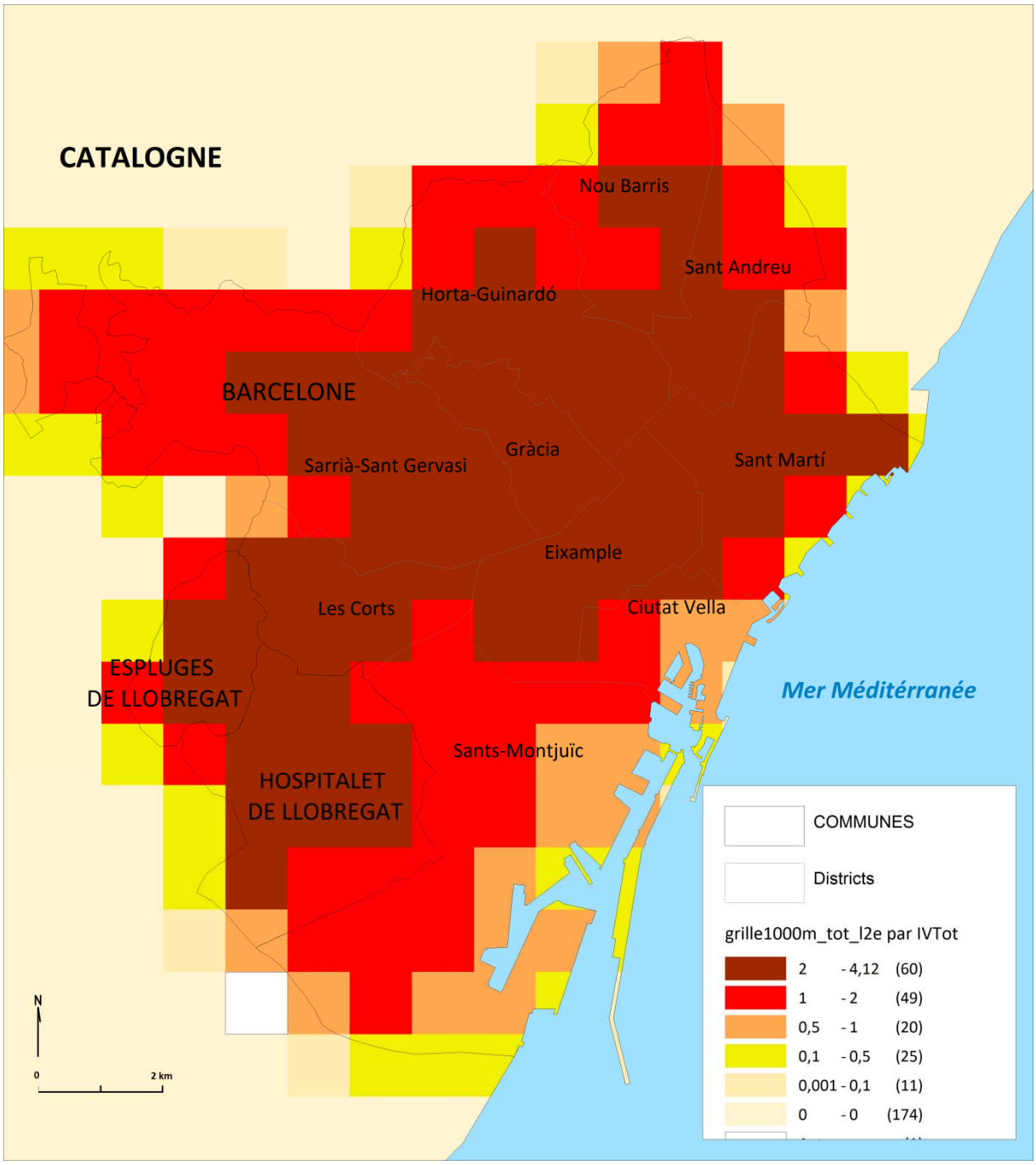
Les sous-espaces qui contiennent un indice de couverture important (supérieur à 0.5) à la fois à l'échelle des grilles de 500 et des grilles de 100, peuvent être considérés comme « sûrement » affectés par la coupure électrique (par exemple la zone centrale du district de Gracia). Néanmoins, à la vue de la carte 52, ces sous-espaces ne sont pas nombreux ; les

informations des couches précises et de précision moyenne semblent davantage complémentaires que correspondantes dans le sens où les informations précises (grille 100) ne coïncident pas nécessairement avec les informations de précision moyenne, en particulier dans la partie ouest des districts de l'Eixample et la partie est de Les Corts.

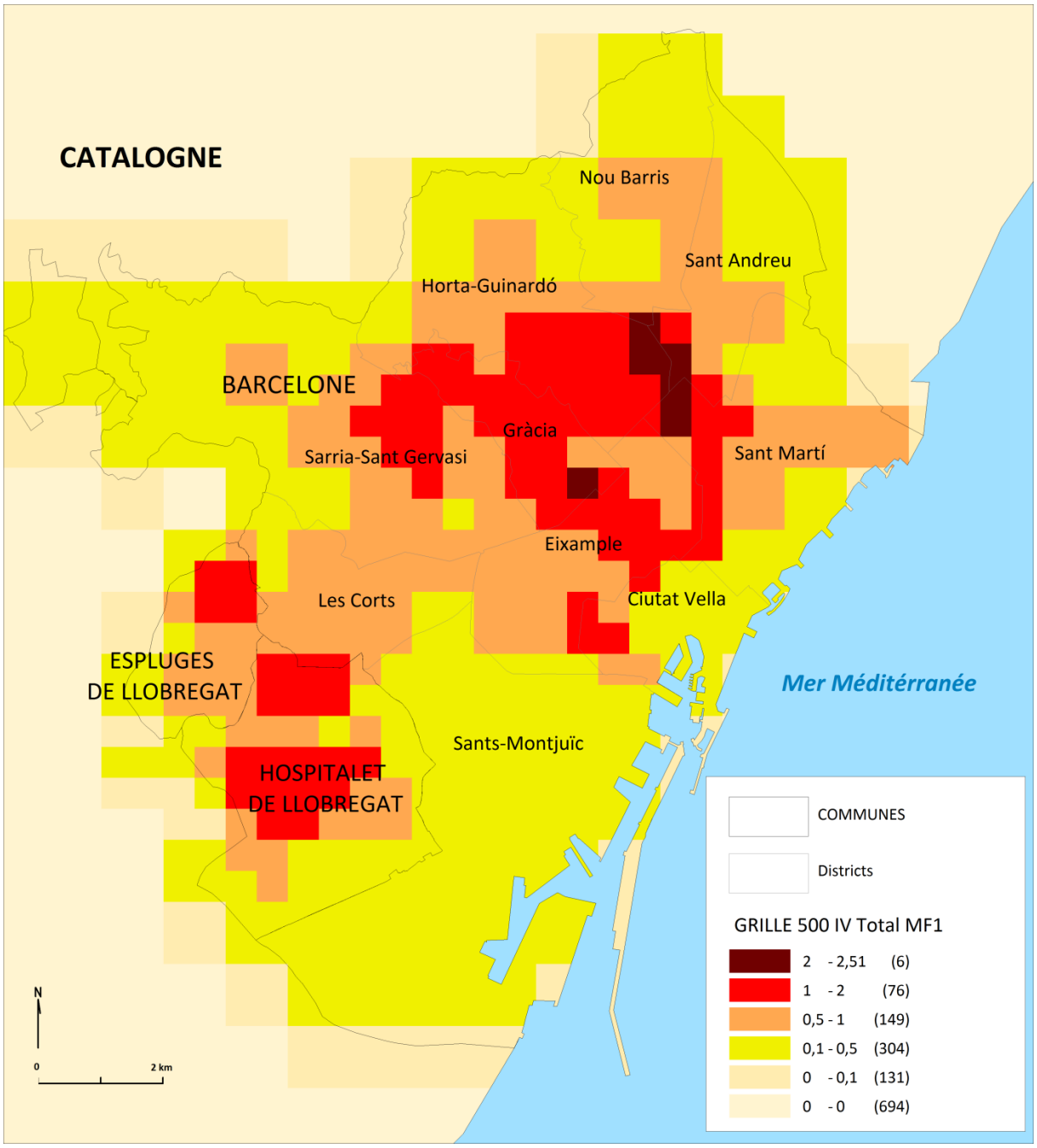
On note également que plusieurs témoignages précisément localisés se situent en bordure immédiate ou entre deux zones de concentration de cellules identifiées comme coupées à l'échelle des mailles de 500. Cette observation accrédite notre idée précédente selon laquelle, dans notre cas d'étude, les informations de précision forte et de précision moyenne possèdent une forte complémentarité : les données lacunaires dans les deux niveaux de granulométrie ne correspondent pas nécessairement aux mêmes sous-espaces. Les périmètres dessinés par les données à l'échelle de précision intermédiaire semblent dans certains espaces être prolongés par des zones d'accumulation de points (informations de la maille 100.)

La faible différenciation spatiale dans les informations de la grille 1000 est également à souligner comme une limite des résultats obtenus avec cette méthode de fusion. Au-delà du choix d'établir une seule classe pour les valeurs supérieures à 2 dans la discrétisation des ICV, cette faiblesse est essentiellement due à des informations imprécises surestimant le périmètre de la coupure ; quand on considère la phrase « la commune de Barcelone est touchée par une coupure électrique» par exemple, l'information n'est pas erronée mais imprécise, approximative et généralisante. Pourtant, les données imprécises auraient pu s'avérer indispensables si aucune information de précision moyenne ou forte n'avait été recensée pour les sous-espaces coupés à l'intérieur des communes de L'Hospitalet et Espluges de Llobregat. L'intérêt d'une méthode qui autorise l'utilisation de ces données imprécises en complément de données plus précises n'est donc pas remis en cause.

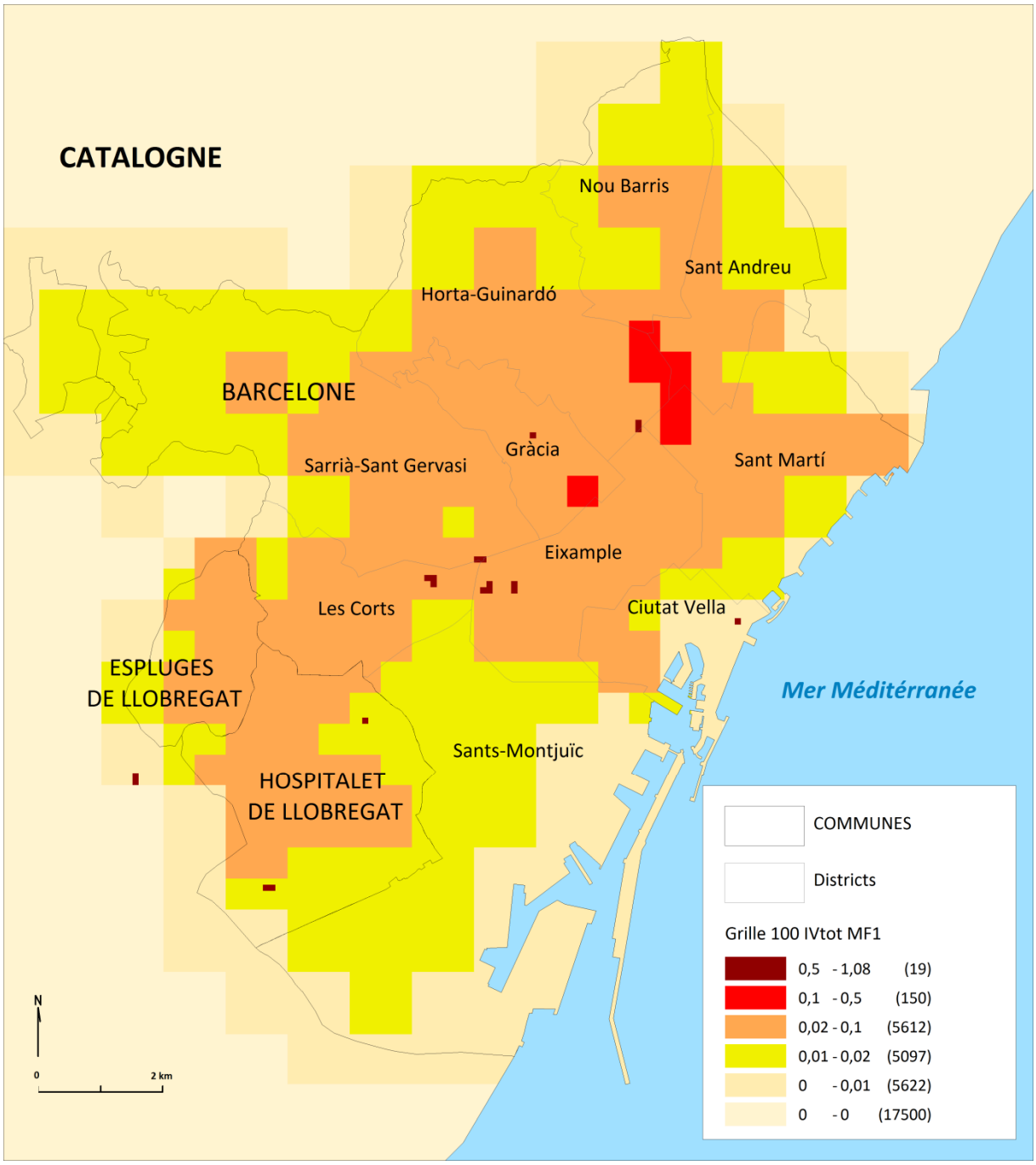
Les importants effets de bord et le caractère très brutal et rectiligne des discontinuités spatiales imbriquées de la carte 3 sont par contre identifiés comme des limites de ce mode de représentation spatiale des coupures électriques. Nous tenterons de minimiser ces effets dans la section 6.2.3 en combinant les résultats des grilles à une méthode de traitement des « péri-informations » syntaxiques comportant des localisateurs et des quantificateurs flous. Mais avant, intéressons-nous aux résultats obtenus avec la méthode de fusion 2 dans les cartes 53 à 55.



Carte 53 : Estimation des sous-espaces affectés par la coupure électrique de Barcelone. Méthode de fusion algébrique des 7 grilles initiales à l'échelle des cellules de 1000m. et valeurs de l'ICV.



Carte 54 : Estimation des sous-espaces affectés par la coupure électrique de Barcelone. Méthode de fusion algébrique des 7 grilles initiales à l'échelle des cellules de 500m. et valeurs de l'ICV.



Carte 55 : Estimation des sous-espaces affectés par la coupure électrique de Barcelone. Méthode de fusion algébrique des 7 grilles initiales à l'échelle des cellules de 100m. et valeurs de l'ICV.

Comme nous l'avons précisé dans la section précédente, même si elles comportent plus de deux plages de valeurs, les cartographies sont sensées distinguer deux états des territoires : affectés par la coupure électrique ou pas.

Evidemment, les données fusionnées à l'échelle de 100 mètres (carte 55) conduisent à des observations plus fines que celles obtenues à l'échelle des mailles moyennes ou imprécises même si la maille imprécise (carte 53) nous permet d'observer certaines discontinuités importantes, notamment la baisse des valeurs de l'ICV pour le district de Sant MontJuic. Cette baisse se confirme d'ailleurs aux deux autres niveaux de granulométrie, ce qui nous autorise à penser que le district de Sant MontJuic n'a sans doute pas subi, ou que très partiellement, de rupture d'approvisionnement électrique. A l'inverse, les cartes 54 et 55, nous permettent de dire que les districts de la zone centre Gracia, Les Corts et l'Eixample sont certainement les plus touchés par cette coupure.

Les districts plus au nord de cette zone, comme Horta Guinardo, Nou Barris, San Andreu et San Marti semblent plus faiblement compris dans des périmètres recensant des coupures électriques. La carte fusionnée à l'échelle de 500 fait ressortir une zone qui comprend la zone de Gracia, le sud de Horta Guinardo, une partie de San Gervasi et la limite Sud de Ciutat Vela, comme des espaces très certainement touchés par la coupure ; ces espaces ressortent moins nettement dans la carte de la maille précise (100m) pour laquelle les cellules comportant des valeurs fortes d'ICV se concentrent autour de la limite des quartiers des Corts et d'Eixample. Ce décalage de zone de la plus forte certitude entre les maillages 100 et 500 s'explique par les divisions des valeurs des ICV lors des transferts entre les différents niveaux de grilles. Il ne faut pas voir là une limite de la méthode mais un de ses apports : l'intérêt de s'appuyer sur différents niveaux de granulométrie, même pour la représentation des données fusionnées.

Dans les cartes 54 et 55, le carré jaune au milieu de la zone orange dans le district de San Gervasi est sans doute dû davantage à des données lacunaires qu'à une absence de coupure dans ce sous-espace. L'état de la zone de Ciutat Vella peut être qualifié d'incertain dans la mesure où malgré des valeurs d'ICV assez faibles à l'échelle de 500 et de 1000, on note une cellule comportant une valeur précise, lorsque les données sont fusionnées à l'échelle de 100. Pour les communes de Espluges et de Hospitalet, on dispose de moins d'informations sur la différenciation intra urbaine de la coupure, ce qui conduit à davantage d'incertitude. Si aucune différenciation spatiale ne ressort à l'échelle de 1000 pour ces communes, à l'échelle de 500 et 100, il semble que les coupures ne concernent pas intégralement les deux communes.

6.2.3. Introduction des quantificateurs et des localisateurs flous

Cette partie présente la manière dont nous avons intégré à l'analyse, les informations qualitatives textuelles qui entouraient les mots désignant les lieux dans les différentes sources d'informations de la base de données @pagon. Nous parlerons de « péri-information » pour qualifier ces expressions adjointes à l'information spatiale brute. Ainsi, certaines informations spatiales sur les territoires coupés, qui figurent dans la base de données @pagon, associées à des péri-informations, ont été ventilées en deux catégories : les quantificateurs flous et les localisateurs flous.

Les quantificateurs flous sont une formalisation mathématique assez ancienne (Mostowski, 1957) qui consiste à établir « des systèmes de déductions fondés sur des appréciations linguistiques correspondant à des intervalles de valeurs » (Gacogne, 1995). Les applications possibles de cette formalisation sont très diverses, un exemple classique de la méthode est celui de la vitesse d'une automobile (figure 52) ; si l'on considère la vitesse 70km.h elle co-appartient à l'intervalle vitesse faible (à un degré de 0.25) et à l'intervalle vitesse moyenne (à un degré de 0.75.

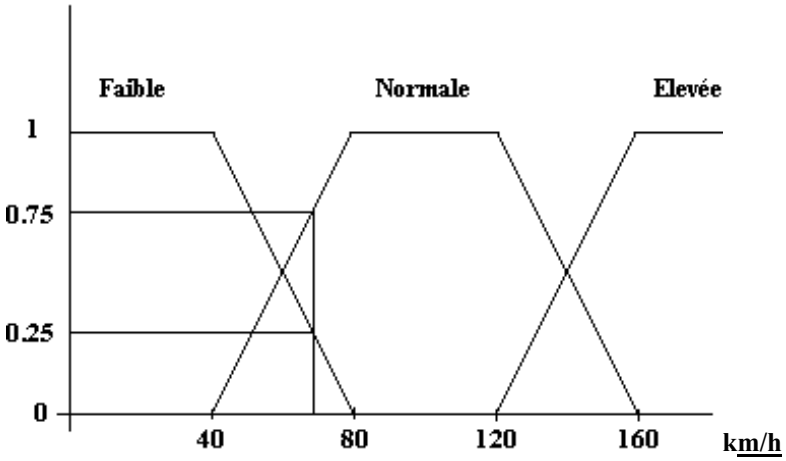


Figure 52 : Les vitesses automobiles, application des intervalles flous. (POBOT, Unice, 2003).

Dans la base de données @pagon, les quantificateurs flous sont issus des expressions qui désignent la gravité ou le niveau de complétude du périmètre affecté par la coupure électrique. Exemples de la BD @pagon « considerablamente » (considérablement), « el mas » (le plus), « excepto » (sauf), « menor medida » (moindre mesure), «casi todo el barrio» (Presque tout le quartier), « buena parte » (grande partie). Une particularité de notre approche vient du fait qu'elle consiste à gérer le flou textuel par la spatialisation, c'est-à-dire que les intervalles flous désignant un périmètre donné vont être traduits dans l'espace en délimitant des marges d'incertitudes en bordure de ces formes (carte 56 à 58). Par exemple, si l'on considère les informations textuelles simples renvoyant à l'absence du phénomène dans un sous espace ou l'exclusion d'un sous espace d'un périmètre impacté (pas, sauf, mise à part…), on attribue la valeur (-2), si l'information renvoie à une intensité plutôt faible du phénomène sans être absente (moins, faible, partiel peu…), on attribue la valeur (1), alors que si l'expression renvoie à une importance forte du phénomène ou une couverture importante du sous espace (fortement, considérablement, presque tout…) on attribue la valeur 2. La valeur 3 renvoie aux expressions les plus superlatives (très fortement, le plus grave.)

A ce stade, il ne s'agit donc pas d'intervalles flous mais d'une échelle de valeurs précises associées à des expressions qualitatives ; pour introduire le flou, on va s'appuyer sur la morphologie des objets spatiaux associés aux informations textuelles, de telle sorte que dans la première bordure (par exemple dans les 100 mètres à l'intérieur du périmètre pour les districts), la valeur de l'information textuelle soit réduite de 50% ; dans la seconde bordure (500 mètres à l'intérieur du périmètre à partir de la limite de la bordure), la valeur est réduite de 20% de telle sorte que nous obtenons des zones de flous en fonction de la distance, considérant que l'information sur les marges d'un périmètre déclaré est plus incertaine que celle portant sur le cœur de ce périmètre. Ainsi, l'on considère que lorsqu'une personne indique « il y a une coupure dans une zone », il y a davantage de fiabilité de l'information sur le cœur de la zone désignée que sur ses bordures. L'expression « tout » par exemple, n'est pas associée à une valeur précise de 1 mais à un intervalle allant de 0.5 à 1 en fonction de la position de la cellule par rapport à la géométrie de l'objet signalé pour une coupure électrique.

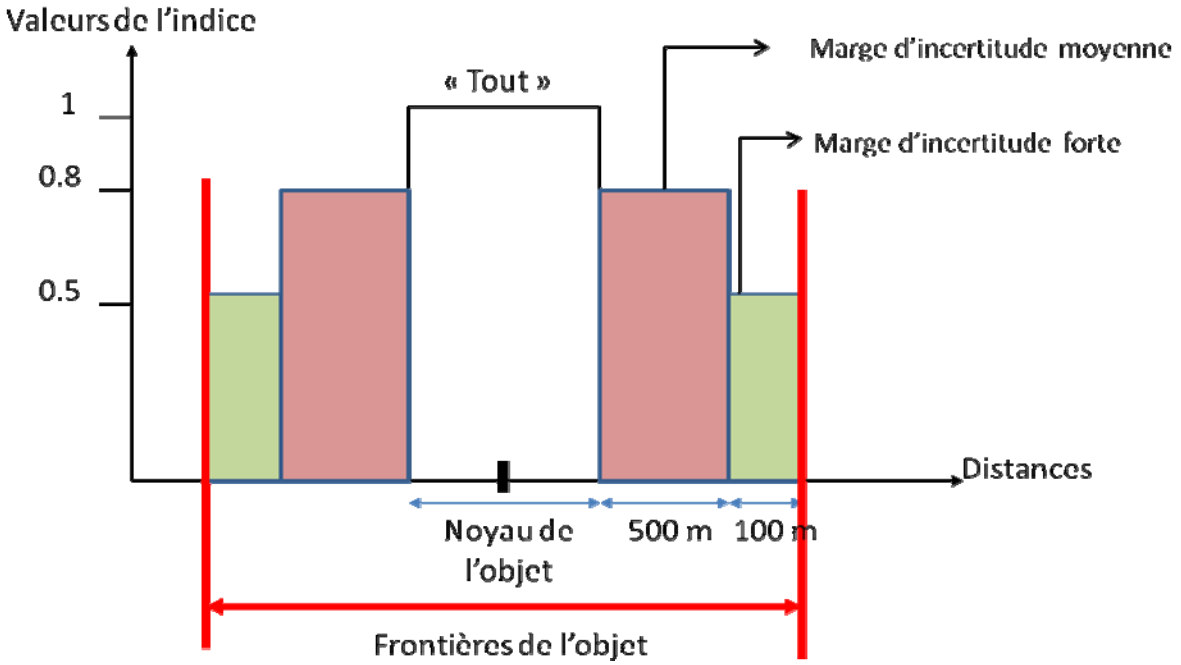
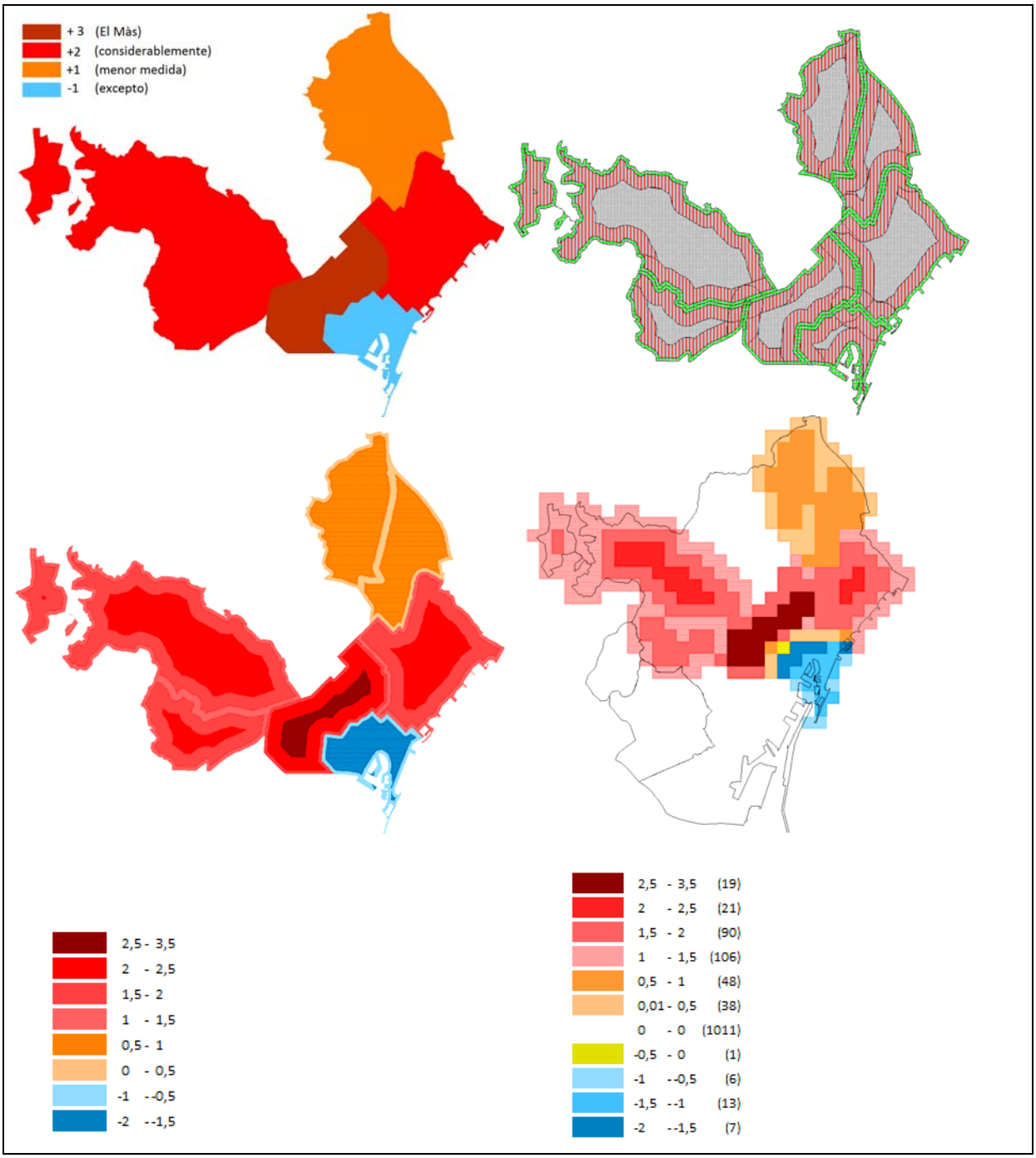


Figure 53 : Méthode de délimitation des zones d'approximations pour les objets « districts » appliquée à l'expression « tout ».

Dans l'exemple présenté en carte 56, les informations ont été spatialisées à partir de cette méthode, les valeurs entre parenthèses correspondent à l'indice associé à l'expression qualitative. Les valeurs sont ensuite « fuzzyfiées » et transférées à l'échelle des cellules.

- « afectaron **considerablemente** (2) a los distritos de Sant Marti, Corts, Sarria-Sant Gervasi,
- y en **menor medida** (1) a Sant Andréu, y Nou Barris.
- El distrito del Eixample, **el más** (3) afectado por el apagón.
- Sin luz **excepto** Ciutat Vela (-2)



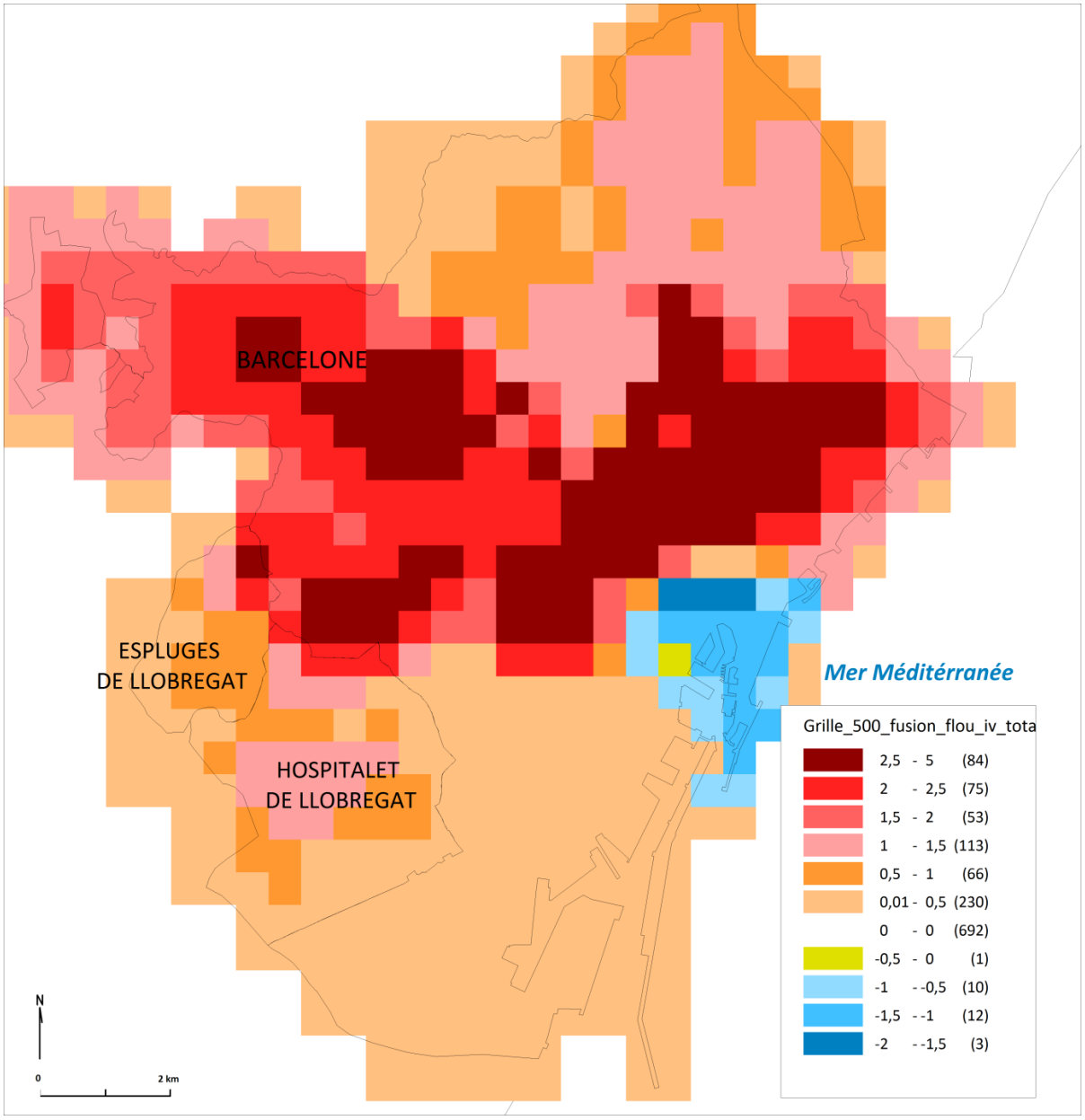
Carte 56 : Traitement de l'information qualitative par une méthode de spatialisation floue. Carte Haut-Gauche : l'information brute extraite des expressions qualitatives précédentes, carte Haut-Droit : distinction entre le noyau de certitude et les marges plus incertaines (la valeur en vert correspond à la marge d'incertitude forte décrite en figure 53, carte Bas-Gauche : croisement des couches des 2 cartes précédentes et carte Bas-Droit : passage à des valeurs dans les grilles de 500.

Les valeurs négatives (en bleu sur la carte 56) se situent dans le district de la vieille ville, pour lequel nous disposons d'une information indiquant la présence d'électricité. Néanmoins, cette information est datée de 4 heures après le début de la panne ce qui ne permet pas d'exclure l'hypothèse selon laquelle le quartier aurait pu être coupé dans ce laps de temps. Comme souhaité, la méthode permet de valoriser l'information au cœur des périmètres explicitement

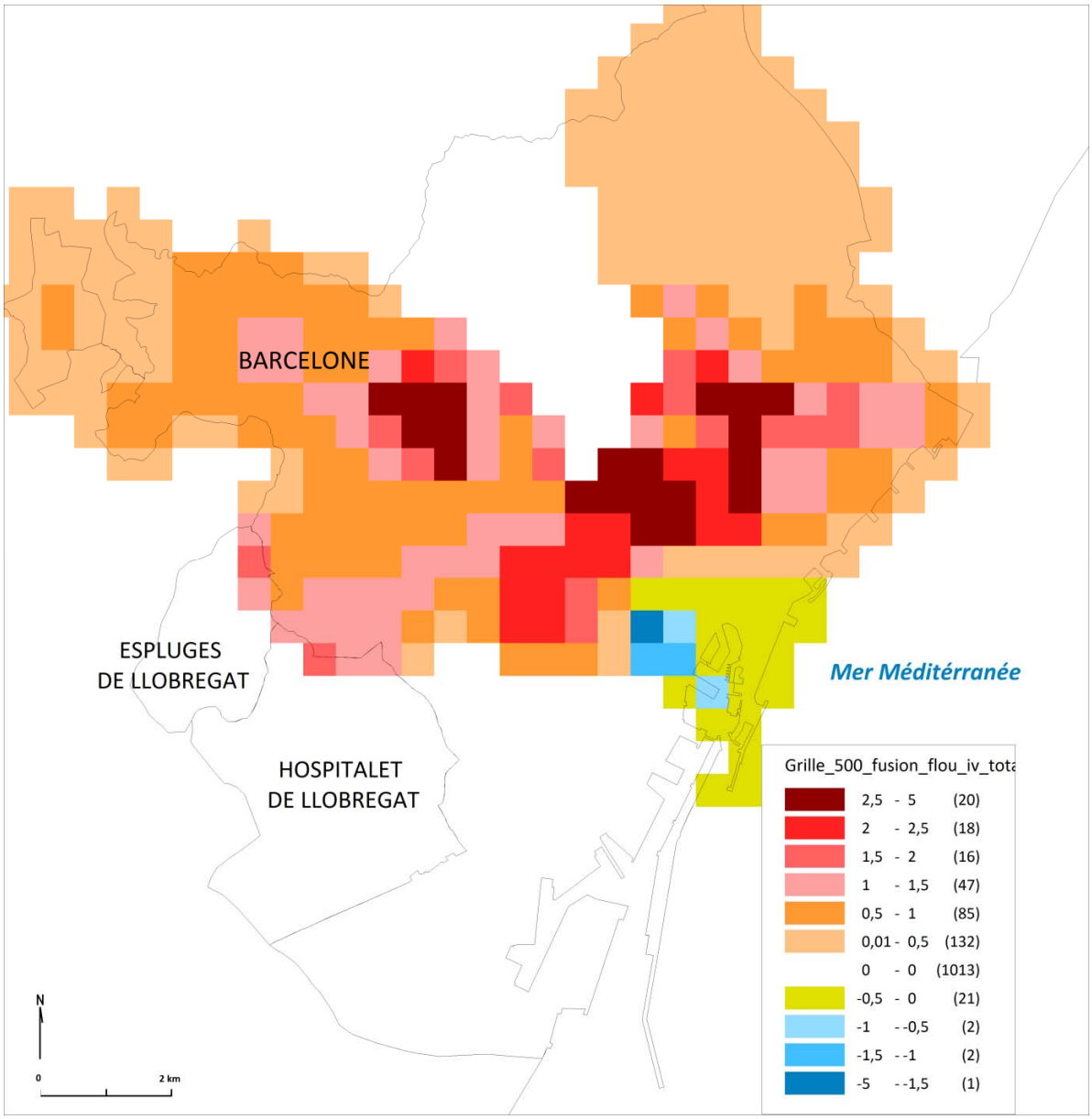
cités dans la source, alors que celle sur les marges est plus incertaine. Dans un second temps, les localisateurs flous sont intégrés dans l'analyse. On considère cette fois, les expressions spatiales qui vont préciser ou qualifier le degré d'approximation d'une localisation : « aux environs de, voisine de, près de, loin de, à partir de, jusqu'à, au Nord de, au Sud de… ». Ces « péri-informations » sont assez peu nombreuses dans la base de données @pagon, nous les avons traitées à l'aide de buffers pour l'information autour de (acerca de) ou en rattachant l'information à une maille différente que celle choisie dans la section précédente.

6.2.4 Fusion des données

Les résultats obtenus à partir des informations qualitatives sont ensuite fusionnés avec ceux des indices de couverture des mailles imbriquées (sous partie 6.1.3). La méthode a été réalisée en synthétisant l'ensemble de l'information dans le maillage intermédiaire (500m) ; deux techniques ont été testées, la première consiste à additionner les deux indices pour chaque cellule de 500 alors que dans la seconde méthode, sera introduite la contrainte : seules les cellules renseignées dans les deux bases de données ont un résultat différent de 0, en multipliant les deux indices. Dans ce cas, à l'échelle d'une cellule, si une des deux valeurs (ICV ou indice des informations qualitatives) est nul, alors l'indice fusionné l'est également.



Carte 57 : Estimation des sous-espaces affectés par la coupure électrique de Barcelone. Fusion additive des résultats des indices de couverture des mailles (cartes 54 * 56) et des quantificateurs-localisateurs flous.



Carte 58 : Estimation des sous-espaces affectés par la coupure électrique de Barcelone. Fusion multiplicative des résultats des indices de couverture des mailles et des quantificateurs-localisateurs flous.

Nous avions indiqué précédemment, qu'il n'y avait pas de seuil précis pour distinguer, à partir des indices construits, une valeur de transition entre l'état « approvisionné en électricité » et l'état « non approvisionné en électricité ». Pour cette raison, nous avons décidé d'appliquer la technique des intervalles flous pour mieux appréhender les résultats obtenus (carte 57 et 58). Les intervalles sont construits de manière à dissocier 4 types d'états des cellules : approvisionné en électricité, coupure inférieure à 4 heures, non approvisionné en électricité et des zones d'incertitudes. La figure 54 présente les intervalles proposés pour la distribution statistique des indices fusionnés de manière additive.

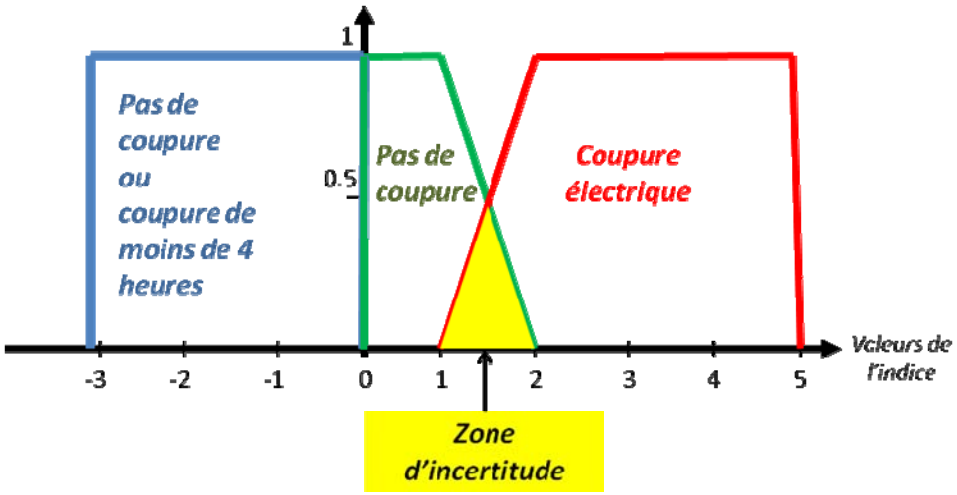
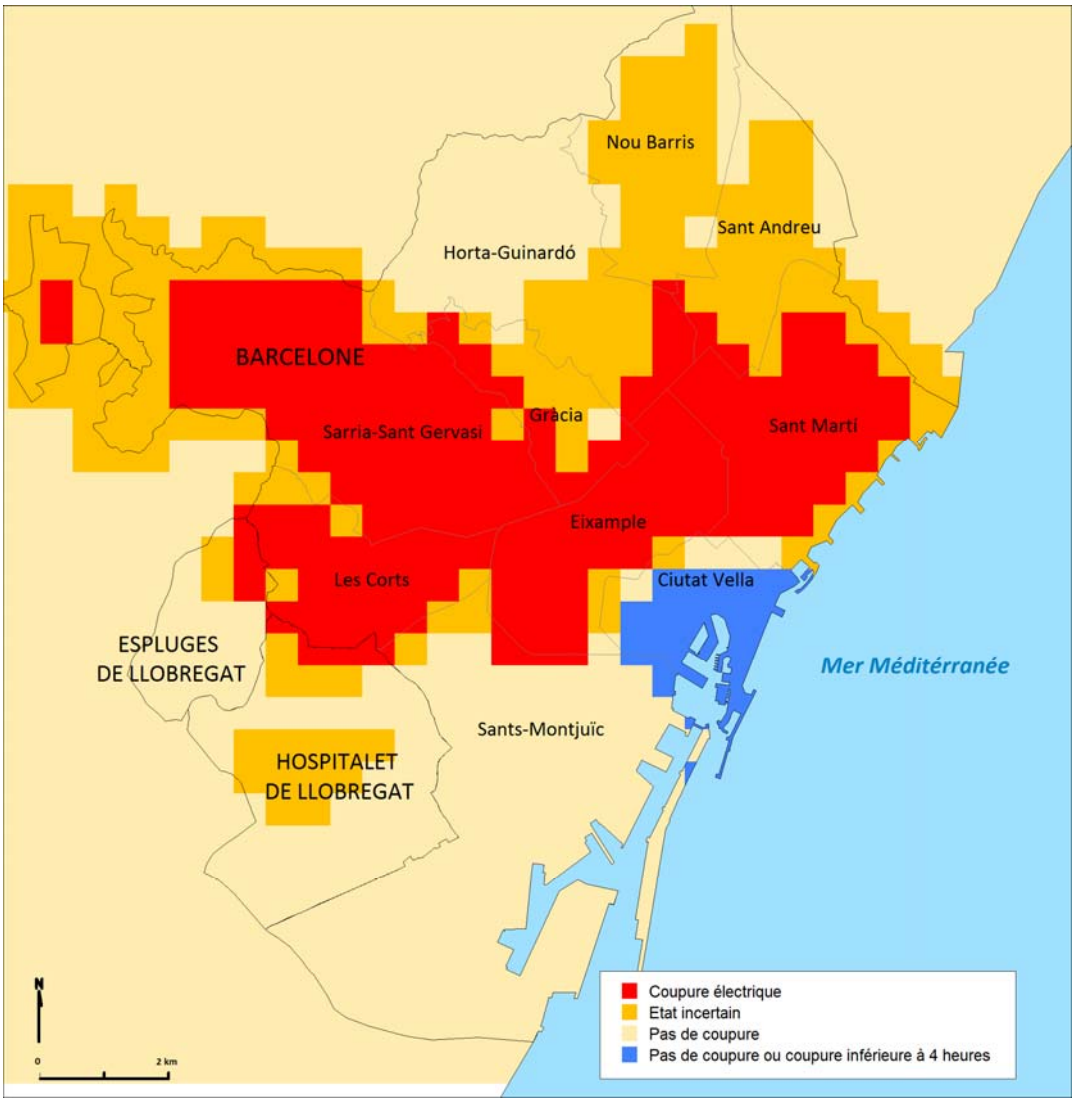


Figure 54 : Définition des intervalles flous pour déterminer l'état des cellules spatiales en termes d'approvisionnement électrique à partir des indices fusionnés de manière additive.



Carte 59 : Estimation des sous-espaces affectés par la coupure électrique de Barcelone selon la méthode de fusion additive.

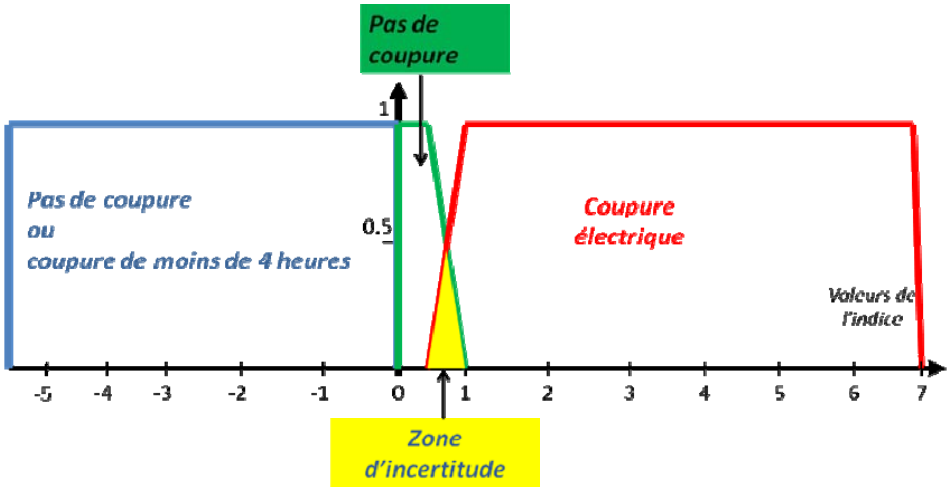
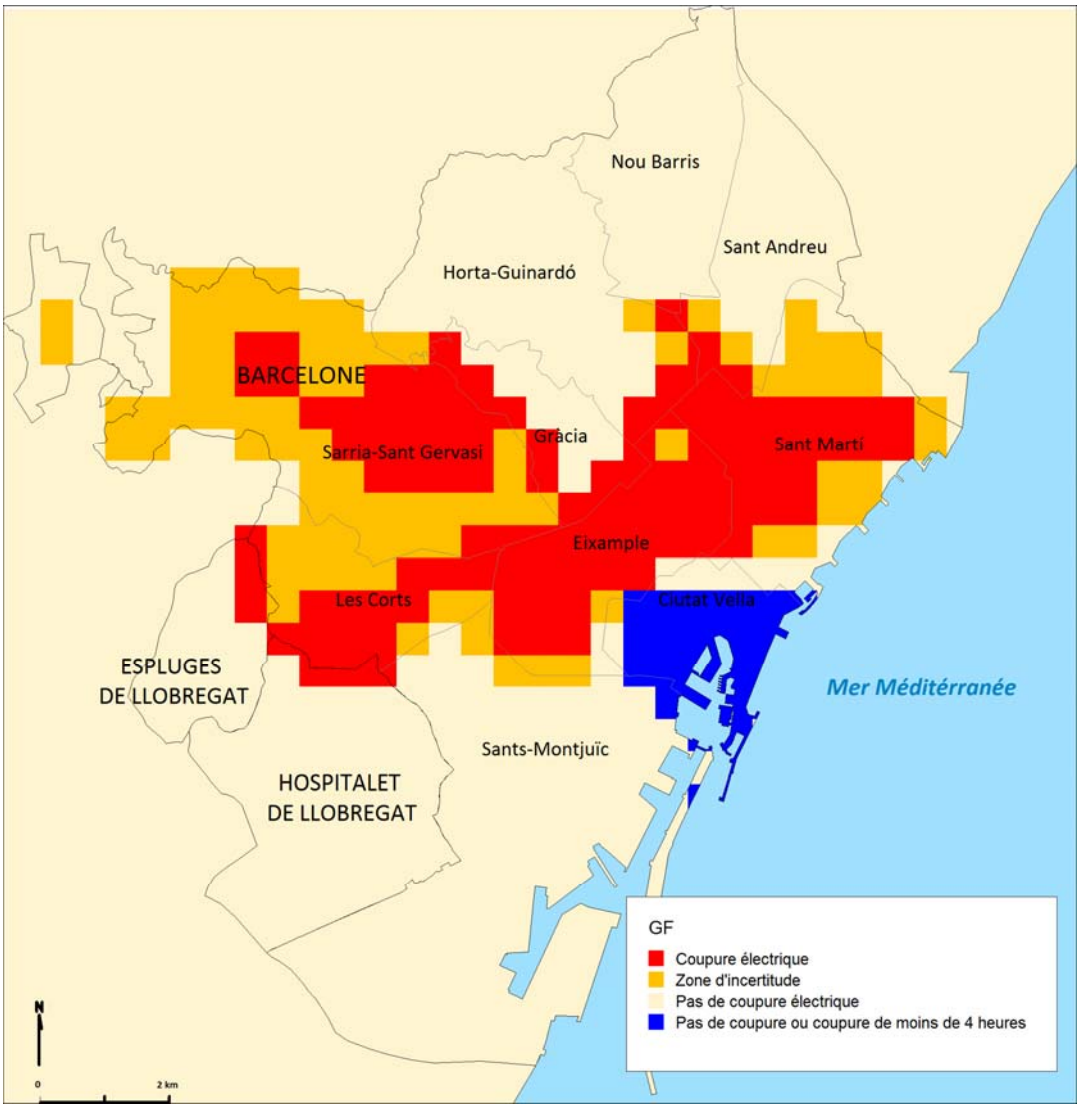


Figure 55 : Définition des intervalles flous pour déterminer l'état des cellules spatiales en termes d'approvisionnement électrique à partir des indices fusionnés de manière multiplicative.



Carte 60 : Estimation des sous-espaces affectés par la coupure électrique de Barcelone selon la méthode de fusion multiplicative.

Avant d'interpréter les résultats obtenus en carte 59 et 60, il nous faut justifier l'adaptation des intervalles flous entre la méthode additive et la méthode multiplicative (figure 54 et 55), qui, au même titre que la définition des intervalles, contient une part de subjectivité et peut nécessiter plusieurs tests. Dans la méthode additive, l'intervalle de la zone d'incertitude est par exemple entre [1 ; 2] alors qu'il se situe entre [0.5 ; 1] dans le cas de la méthode multiplicative (figure 54 et 55). Cette adaptation vient du fait que la multiplication des valeurs d'ICV compris entre 0.1 et 0.5 (qui correspondent à un état d'incomplétude) par des entiers compris entre 2 et 5, aboutit à de nombreux résultats compris entre 0.5 et 1. Si nous utilisions les mêmes intervalles que dans la méthode additive, ces résultats ne seraient donc pas considérés comme «état incertain» alors qu'ils correspondent à la fusion d'une valeur d'incertitude avec une autre valeur d'incertitude ou même une valeur de certitude de coupure. Si l'on considère par exemple, une cellule possédant un indice de couverture de maille ICV = 0.4 (état d'incomplétude) fusionné à l'information qualitative (considérablement) V = 2, on obtient un indice total de 0.8 avec la méthode multiplicative alors qu'il est de 2.4 avec la méthode additive. On comprend alors que l'utilisation de seuils similaires pour les deux méthodes n'était pas adaptée.

D'autre part, le caractère plus restrictif du périmètre obtenu avec la méthode multiplicative de la coupure électrique est dû au caractère contraignant qu'instaure ce mode de fusion. En effet, les données ne sont sans doute pas suffisamment exhaustives pour que l'absence de données dans une des deux bases (base sur les indices de couverture des mailles et base de données obtenue à partir du traitement des expressions qualitatives) conduise systématiquement à la déclaration de cette cellule comme « non atteint par la coupure électrique ». Si l'on s'intéresse aux zones de discordances et de concordances entre les deux résultats obtenus en carte 59 et 60, l'on peut noter :

- Une structure spatiale proche (noyau de certitude entouré d'une zone d'incertitude). Les grandes lignes du périmètre de coupure sont assez proches même si la zone de certitude de coupure électrique semble plus étendue dans les résultats avec la fusion additive.
- Certaines discordances assez nettes apparaissent néanmoins dans la catégorie « état incertain ». Les districts de Nou Barris, San Andréu, la partie sud de Horta Guinardo ou encore la commune de Espluges sont déclarés en état incertain dans la carte 59 alors qu'ils apparaissent en zones non affectées dans la carte 60.

Malgré les incertitudes qui persistent dans les résultats, il nous semble que le chaînage de méthodes mises en œuvre pour reconstruire la spatialité de la coupure électrique de Barcelone optimise les quelques informations spatiales disponibles et permet une représentation cartographique de la coupure électrique *a priori* assez cohérente. L'objet de la section suivante sera de valider ces résultats. Nous devrions toutefois parler de co-validation ou de comparaison, car, bien que la méthode employée dans la partie 6.3, n'aboutisse pas à des résultats certains, elle est nettement moins empirique que la précédente et repose sur l'hypothèse d'un déterminisme spatial fort pour expliquer la répartition des territoires affectés par la coupure électrique.

6.3. COMPARAISON À UNE STRUCTURE SPATIALE THÉORIQUE INDUITE PAR L'ORGANISATION DU RÉSEAU DE TRANSPORT ÉLECTRIQUE

6.3.1. Les tessellations de Voronoï pondérées de manière multiplicative (VPM) pour modéliser les bassins de dépendance au réseau électrique.

La comparaison des résultats obtenus dans une démarche empirique de fusion de données spatiales rétrospectives, hétérogènes, incomplètes et incertaines (partie 6.2) avec ceux obtenus par une structuration théorique, statique et morphologique de l'espace par les réseaux électriques (partie 6.3) est menée avec le souci de répondre à trois objectifs :

- tester la fiabilité des résultats empiriques.
- progresser en termes de compréhension des structurations spatiales des systèmes de risques en réseaux.
- progresser en termes de modélisation spatiale des systèmes de risques et d'utilisation des méthodes de géométrie computationnelle pour optimiser la délimitation des zones de dépendance associées à chacun des postes électriques.

L'information utilisée dans la partie 6.3.1 ne porte pas sur la coupure électrique mais sur l'organisation du réseau électrique barcelonais considéré à travers la localisation des postes de transformations électriques. La démarche consiste à s'interroger sur la manière dont le réseau d'électricité différencie spatialement le territoire barcelonais puis à comparer, par une analyse de variance, les structures spatiales obtenues avec la répartition des indices empiriques fusionnés en partie 6.2.

Nous avions précédemment eu recours à une méthode de tessellations hiérarchiques pour modéliser le caractère imbriqué des réseaux électriques (réseaux de transport et réseaux de distribution). La méthode de tessellations pondérées est utilisée cette fois-ci pour tenir compte de la variabilité des niveaux de voltages entre les postes de transformation du réseau de transport électrique. Il existe donc une hiérarchie qui serait de l'ordre vertical dans l'imbrication du réseau de transport et du réseau de distribution modélisée par les tessellations de Voronoï hiérarchiques (VH), alors qu'elle serait de l'ordre horizontal pour la variabilité des niveaux du voltage du réseau de transport électrique, modélisée par les tessellations pondérées (VPM).

Nous rappelons que la structure très hiérarchisée du réseau de transport électrique et la diversité des niveaux de voltages en entrée et en sortie des postes de transformations électriques conduisent à avoir recours aux techniques de pondération des tessellations de Voronoï qui permettent de différencier les points du semis en termes de poids et donc de sphères d'influence. La technique de pondération, dite multiplicative, ne considère pas la distance réelle entre les points, mais la distance multipliée par une valeur de pondération associée à chaque point pour construire la tessellation. Dans notre cas, les valeurs de pondération correspondent aux niveaux de voltage du courant à l'entrée du poste de transformation électrique. Les 15 postes sources situés sur la commune barcelonaise seront donc distingués en 3 catégories : 220 kV, 110 kV et 66kV.

Les tessellations n'ont pas été directement construites dans le système d'information géographique, mais à partir du logiciel WVD (2005), Weighted Voronoi Diagram, application développée en Visual Basic, dans le cadre de la recherche doctorale en géomatique de Mu Lan de l'université de Berkeley (MU, 2005). La bonne interopérabilité entre le logiciel WVD et les logiciels SIG, liée à la capacité d'intégrer au logiciel des données au format (.shp) a largement motivé notre choix. A notre connaissance, le logiciel WVD n'avait pas encore fait l'objet d'applications dans la thématique des risques et des réseaux électriques, néanmoins il nous faut préciser qu'il existe d'autres manières de délimiter les bassins de dépendances électriques, comme les automates cellulaires (Fenwick, Dowell, 1998) ; d'autre part, les polygones de Voronoï pondérés ont déjà fait l'objet, depuis un certain temps, de recherches en analyse spatiale (Huff, 1973) et en optimisation de la planification électrique.

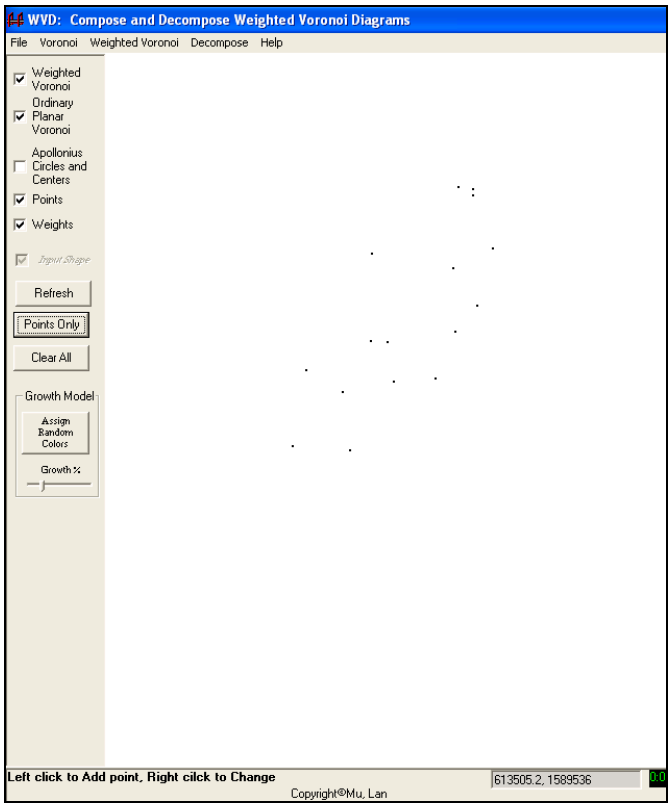


Figure 56 : Implémentation du semis de points correspondant aux postes de transformation électrique de Barcelone dans l'interface WVD.

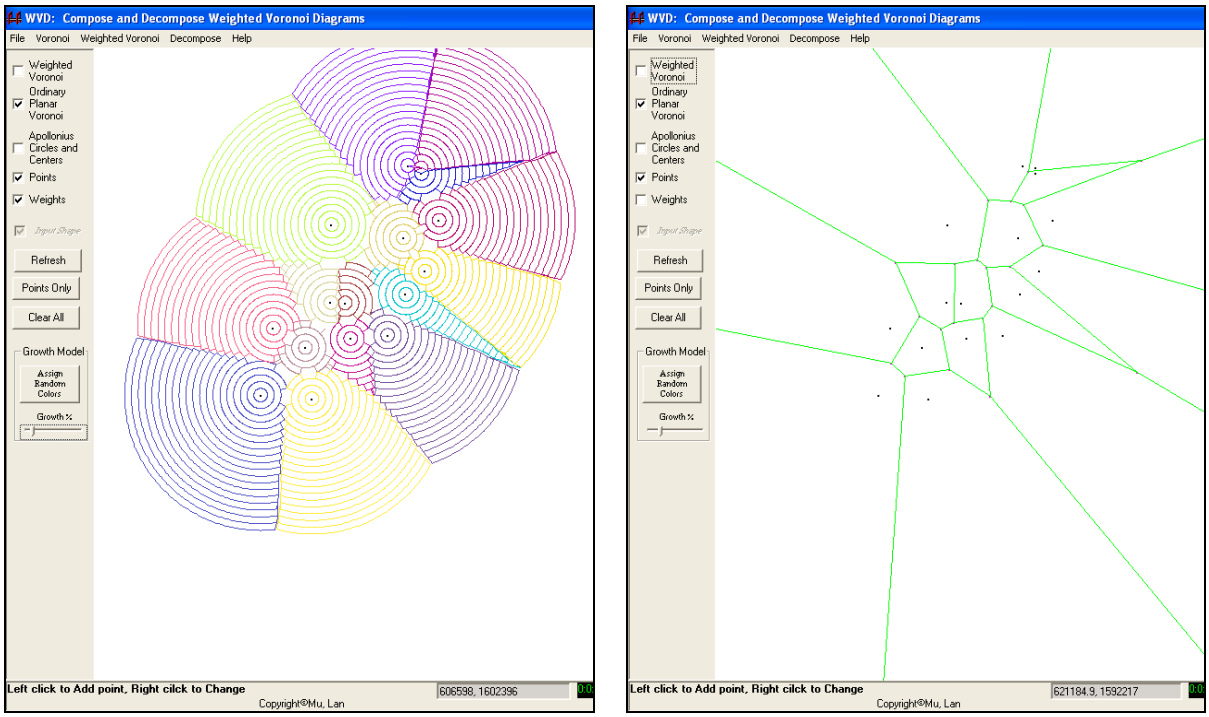
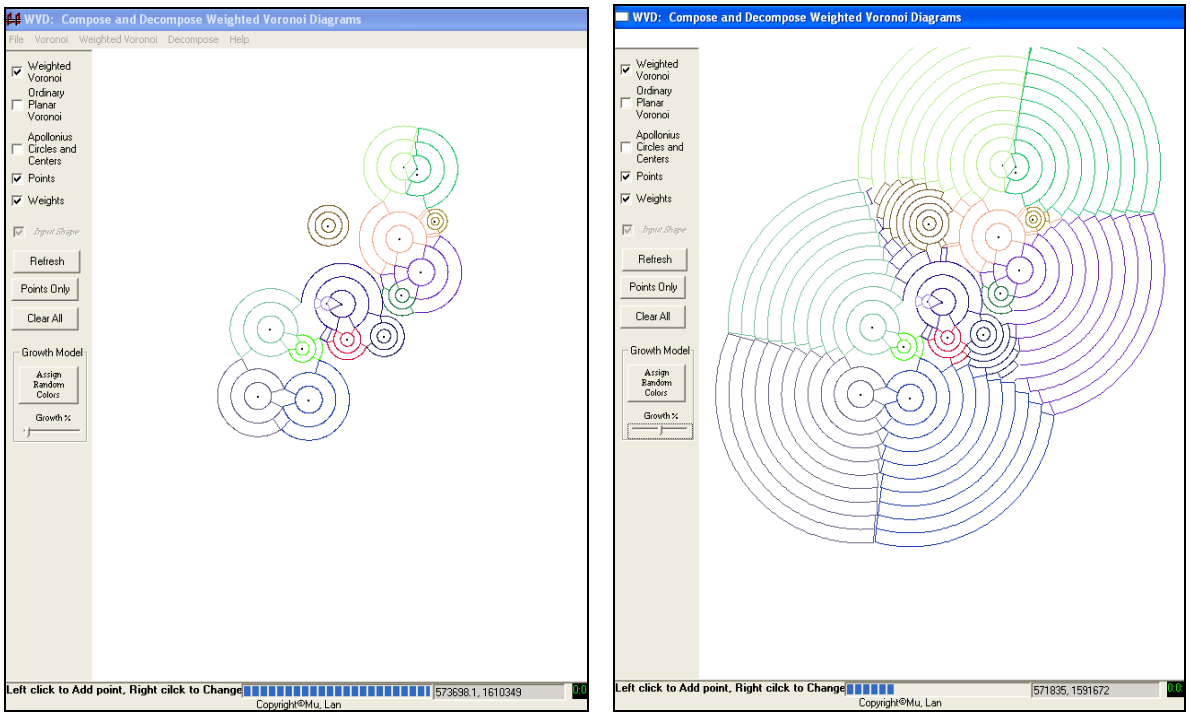


Figure 57 : Construction du diagramme de Voronoï standard associé aux postes de transformations du réseau électrique de Barcelone dans l'interface WVD.



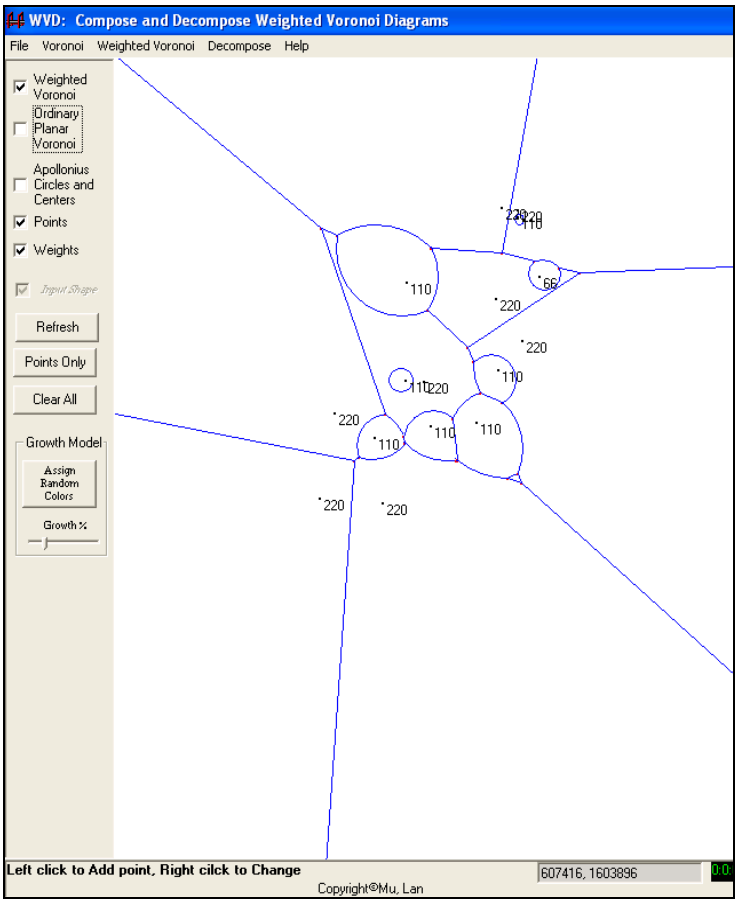
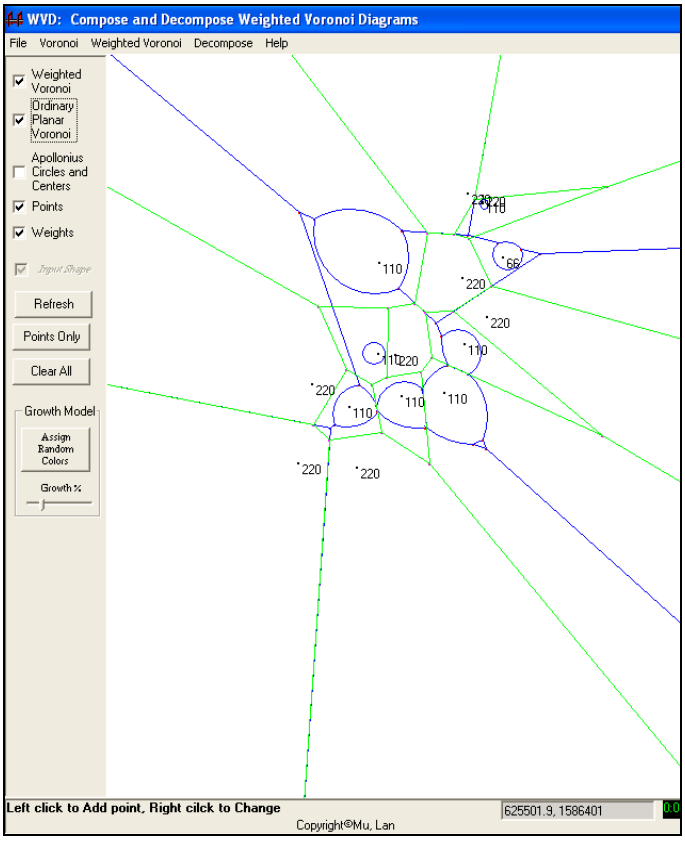


Figure 58 : Construction des polygones de Voronoï pondérés de manière multiplicative associés aux postes de transformations du réseau électrique de Barcelone.



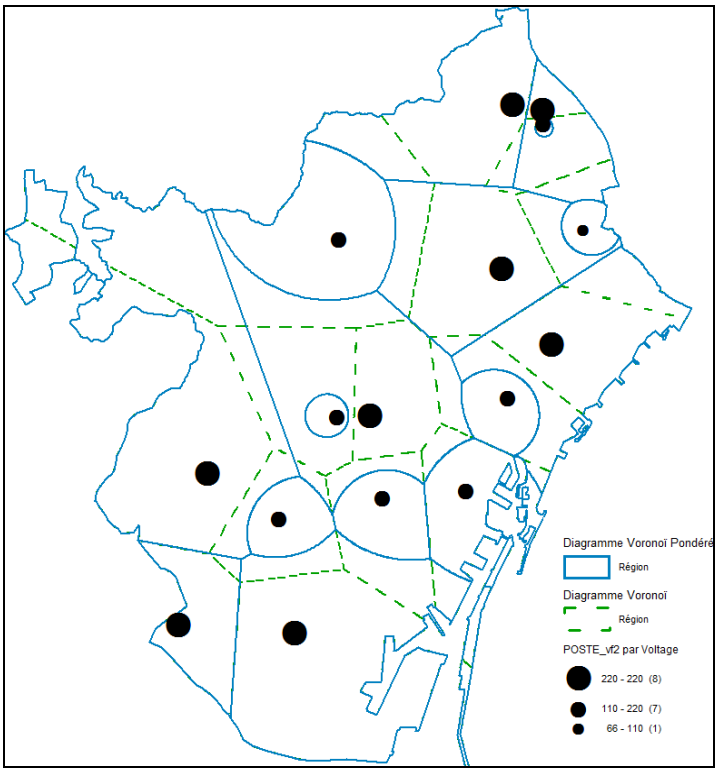


Figure 59 : Comparaison des structures spatiales obtenues avec les polygones de Voronoï standard (en vert) et les polygones de Voronoï pondérés (en bleu) et croisement aux limites communales de Barcelone.

Dans la figure 57, on observe que les cercles successifs qui correspondent à chaque itération, à partir d'un poste électrique, possèdent tous des rayons identiques. Cet élément provient du caractère non pondéré de la tessellation construite. A l'inverse, dans le cas de la figure 58, il est à remarquer que les nœuds de départ sont entourés de rayons différents qui correspondent aux trois niveaux de voltages des postes électriques auxquels ils peuvent être associés.

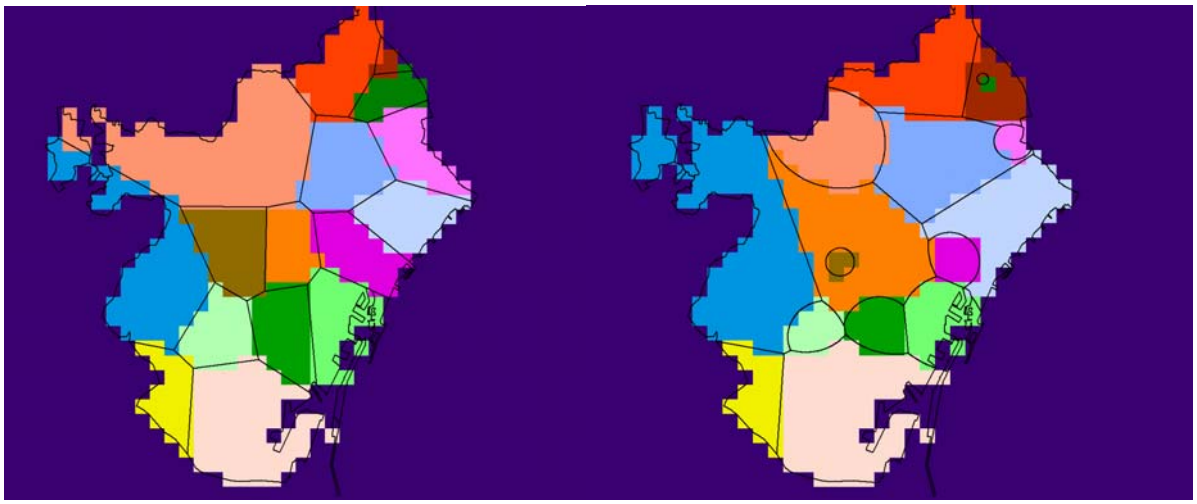
Il faut noter également, l'aspect moins rectiligne des délimitations obtenues avec la tessellation pondérée, qui permet la formation de lignes courbées pour délimiter les bassins de dépendance. D'un point de vue théorique, sans reprendre l'ensemble de propriétés géométriques des tessellations pondérées (Okabé, 2000), il est tout de même important de souligner que les polygones de Voronoï pondérés peuvent contenir des trous, c'est-à-dire des espaces qui ne seraient rattachés à aucun polygone.

La méthode pondérée permet également une structuration imbriquée, par exemple la zone de desserte du poste 110 kv de Corts, est contenue entièrement dans celle du poste 220 kV de Urgell alors qu'elle lui est simplement connexe d'après la méthode de tessellation standard (figure 57). Plusieurs autres différences morphologiques assez nettes entre les deux tessellations sont observables sur la figure 59. Néanmoins à ce stade, nous ne sommes pas en mesure de dire laquelle des deux structures correspond le plus à la réalité.

6.3.2. Analyse de variance et effets d'appartenance spatiale des distributions empiriques

Pour tenter de répondre à cette question nous allons nous appuyer sur les données empiriques fusionnées à l'échelle des grilles, dans la section 6.2, en partant de l'idée que la différenciation spatiale des indices empiriques est structurée par les bassins de dépendances des postes électriques estimés en section 6.31. Ainsi, nous profiterons du fait que la coupure électrique produit une différenciation spatiale (puisque l'approvisionnement électrique devient hétérogène à l'échelle du territoire), pour tester des hypothèses sur les structures spatiales théoriques adaptées à la délimitation des zones de desserte du réseau électrique.

Les bassins obtenus avec les polygones de Voronoï standard et ceux pondérés seront donc testés successivement de manière à déterminer laquelle de ces deux structures théoriques optimise la concordance avec les données observées sur la coupure électrique et l'homogénéité des indices pour les mailles appartenant à une même cellule de Voronoï. Dans un premier temps, chaque maille de 500 mètres a été rattachée à un bassin de dépendance théorique. Les mailles enchevêtrées entre deux bassins ou plus, sont rattachées systématiquement au bassin qui contient la plus grande surface de la maille, de manière à ce que chaque maille appartienne à un seul groupe de cellules.



Carte 61 : Attribution des cellules de 500 mètres aux bassins de dépendances des postes de transformation électrique (tessellations standard à gauche et pondérée à droite).

L'analyse de variance est menée en considérant les indices de la section 2 comme des données quantitatives, et l'appartenance à un bassin de dépendance d'un poste électrique comme donnée qualitative. La décomposition de la variance totale en variance intragroupe et en variance intergroupe doit nous permettre de déterminer si les mailles de 500 mètres appartenant à une même cellule de Voronoï ont tendance à davantage se ressembler (en termes d'indice empirique) qu'elles ne ressemblent aux mailles appartenant aux autres cellules. L'analyse de variance a été appliquée pour les indices fusionnés de manière additive (carte 57) puis pour les indices fusionnés de manière multiplicative (carte 58). On obtient les résultats suivants :

POLYGONES DE VORONOÏ STANDARD	
Indice fusion additive	*Indice fusion multiplicative*
V(tot) = V(inter) + V(intra)	V(tot) = V(inter) + V(intra)
603.1 = 274,85 + 328.25	354,77 = 127,56 + 227,21
R = 0.675 r^2 = 0.46	**R = 0.600 r^2 = 0.36**
POLYGONES DE VORONOÏ PONDÉRÉS	
Indice fusion additive	*Indice fusion multiplicative*
V(tot) = V(inter) + V(intra)	V(tot) = V(inter) + V(intra)
603.1 = 323.99 + 279.11	354.77 = 134.276 + 220.51
R = 0.733 r^2 = 0.54	**R = 0.615 r^2 = 0.38**

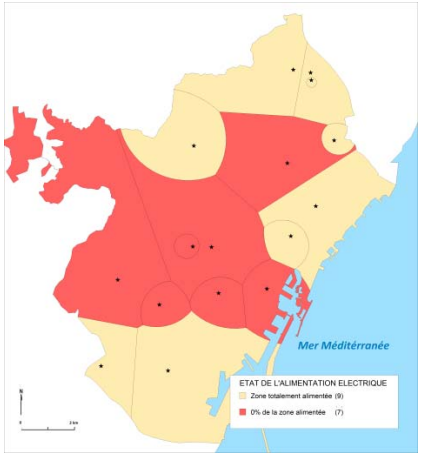
Figure 60 : Synthèse des résultats de l'analyse de variance sur les polygones de Voronoï standard et pondérés.

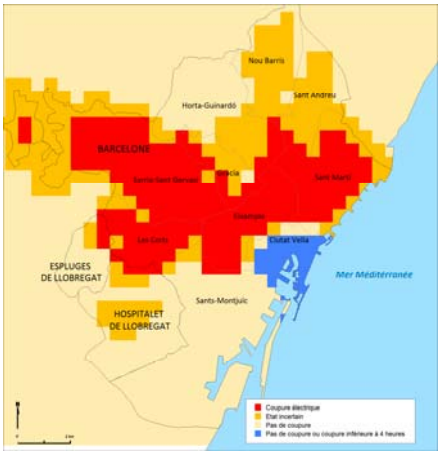
Les résultats de l'analyse de variance présentés en figure 60 indiquent que l'effet d'appartenance spatiale semble plus marqué avec les polygones de Voronoï pondérés. Dans le cas des indices fusionnés de manière additive, comme dans celui des indices fusionnés de manière multiplicative, l'intensité de la relation est plus importante lorsque les tessellations sont pondérées en fonction du voltage des postes de transformation. D'autre part, les indices fusionnés de manière additive obtiennent de meilleurs résultats que ceux fusionnés de manière multiplicative ; cette observation confirme notre observation de la partie 6.2.3 sur le caractère trop contraignant de la fusion multiplicative, compte tenu de l'incomplétude de notre base de données.

6.3.3. Intégration de la base de données sur les dommages aux postes électriques et comparaison des résultats

La base de données @pagon comprend une base de données SIG sur les territoires coupés qui a fait l'objet des traitements de la partie 6.2 ; elle comprend également une base de données temporelles sur l'état de fonctionnement des postes électriques qui n'a, pour l'instant, été aucunement intégrée dans l'analyse. Cette base de données décrit les 16 postes sources du réseau électrique de Barcelone en fonction de la part d'alimentation électrique assurée par chaque poste ; ce taux peut varier de 100% (fonctionnement normal) à 0% (aucune alimentation électrique dans la zone de dépendance d'alimentation du poste). La carte 62 présente une cartographie des postes de transformation et des bassins de dépendance associés, impactés à un moment ou un autre, au cours de la panne électrique. En tenant compte des résultats de la sous-partie précédente, nous avons fait le choix d'utiliser les polygones de Voronoï pondérés de manière multiplicative comme structure spatiale théorique de référence pour les zones de dépendance associées à chaque poste électrique. Les résultats, mis en

parallèle de ceux obtenus par fusion additive des observations empiriques laissent apparaitre des concordances importantes.





Carte 62 : Comparaison des espaces affectés par la coupure, d'après la simulation des polygones de Voronoï pondérés (à gauche) et la méthode de fusion de données empiriques (à droite).

6.4. ANALYSE DES DYNAMIQUES SPATIO-TEMPORELLES DE LA COUPURE ÉLECTRIQUE

6.4.1. La durée de la coupure J-23

Plusieurs approches sont envisageables pour qualifier l'importance d'une coupure électrique, l'indicateur synthétique le plus utilisé est quantitatif : le « pic de clients coupés » ; pour Barcelone, il est estimé précisément à 323 337 foyers privés d'électricité dans les retours d'expérience (la presse annonçait plus de 350 000 foyers touchés au début de la crise). Un second indicateur synthétique se focalise davantage sur la dimension temporelle de la coupure et caractérise le temps de retour du système territorial à un approvisionnement électrique normal. La durée de la coupure est évidemment un facteur déterminant pour qualifier sa gravité, plus une panne électrique va durer, plus ses dommages directs et indirects sont susceptibles d'augmenter.

Par ailleurs, certains impacts indirects peuvent être déclenchés à retardement par la coupure électrique, par exemple lors de la coupure électrique dans le département du Var le 28 février 2001, l'alimentation en eau potable de certains territoires risquait d'être coupée au bout de 48 heures de coupure électrique du fait de l'autonomie limitée des générateurs électriques de secours dans les stations de pompage du réseau d'eau. Enfin, la durée de rupture d'approvisionnement électrique détermine largement son acceptabilité pour les populations, puisqu'une coupure d'une heure est bien plus tolérable et moins pénalisante qu'une coupure d'une semaine. Pour la panne électrique de Barcelone, le temps de retour à un état normal de l'approvisionnement électrique se situe aux alentours de 57 heures, ce qui témoigne d'une inertie assez forte des effets de la coupure. La restauration électrique s'avère irrégulière et progressive comme en témoigne la figure 61 qui croise des informations issues des retours

d'expérience avec des informations de la presse; de fait elle n'est pas un processus de changement d'état homogène et simultané dans l'espace.

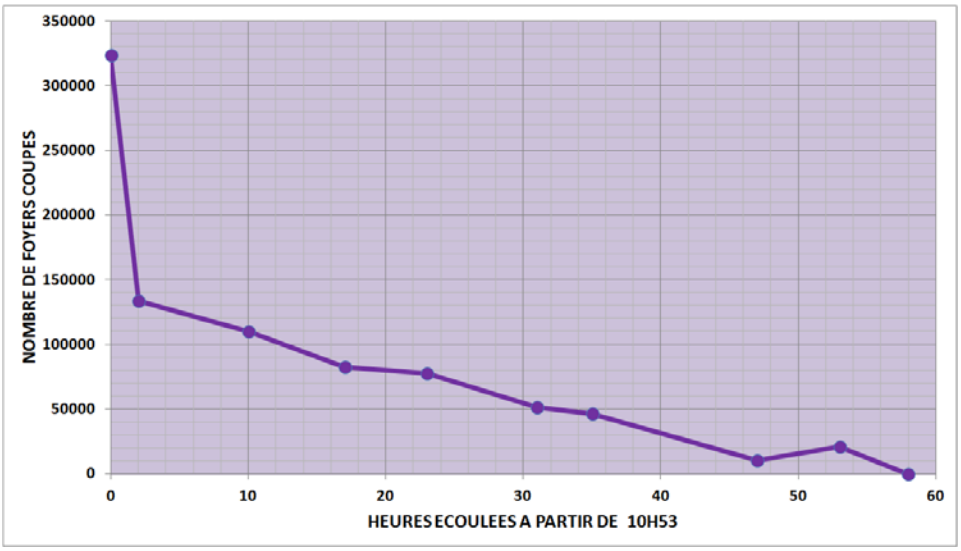


Figure 61 : Evolution du nombre de foyers coupés entre le pic et la fin de la coupure électrique.

La coupure électrique débute dans la matinée et touche 323 000 ménages, parmi lesquels 80 000 vont passer une nuit complète sans électricité et 10 000 deux nuits complètes. On peut distinguer deux rythmes dans la restauration électrique décrite dans la figure 16 :

- la première période correspond aux deux premières heures de la crise, le rythme de restauration est alors très rapide puisqu'on passe d'environ 320 000 à 130 000 foyers coupés entre 10h53 et 13h, soit près de 100 000 foyers restaurés par heure.

- A partir de là, le rythme moyen de restauration des foyers ralentit de manière très nette, puisqu'il se situe entre 2 000 et 3 000 foyers restaurés par heure.

Les informations sur le rétablissement progressif de chaque poste de transformation électrique sont les rares données quantitatives, non synthétiques, et disponibles publiquement dans les retours d'expériences sur le J-23. Dans la figure 62, nous avons synthétisé la dynamique de restauration des composantes du système électrique affectées par la panne. Contrairement à la figure 61, dans un souci de lisibilité, les intervalles temporels en abscisse ne sont pas représentés de manière proportionnelle et ne sont pas réguliers, ainsi le premier intervalle correspond à l'écoulement de quelques secondes alors que le dernier intervalle correspond à 'écoulement de 2 400 minutes.

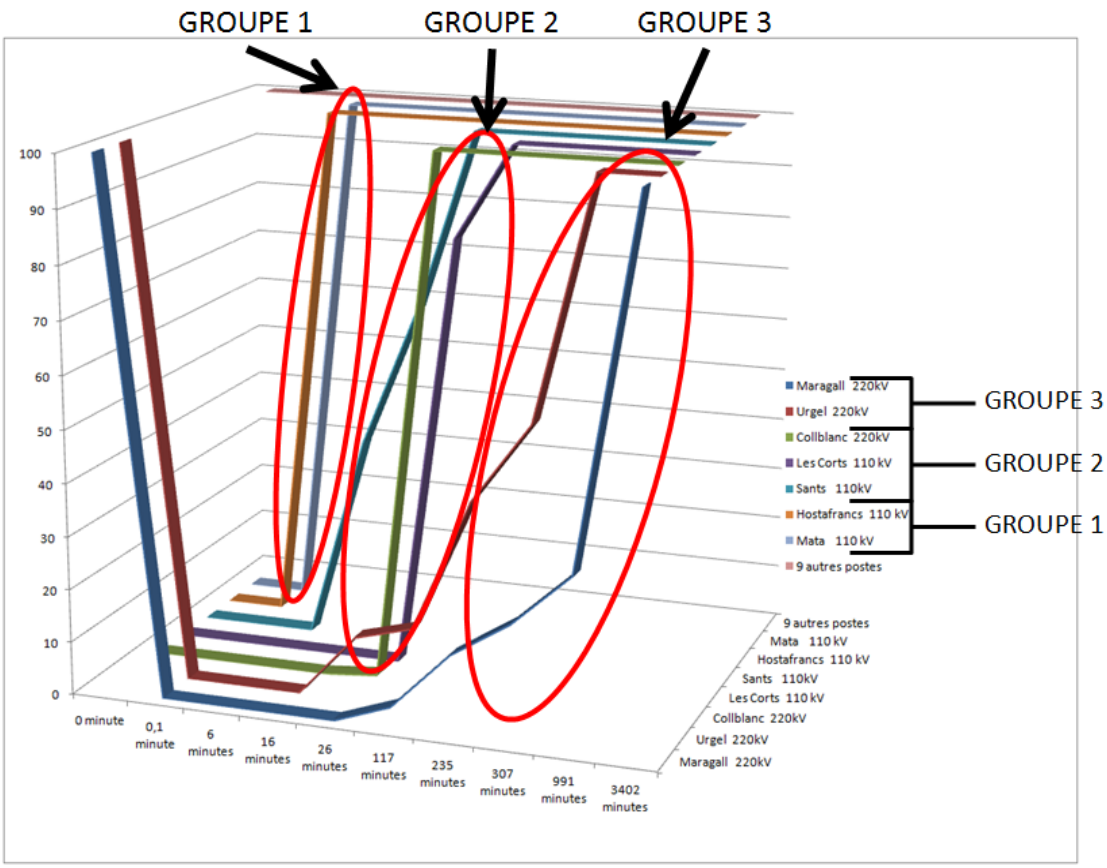
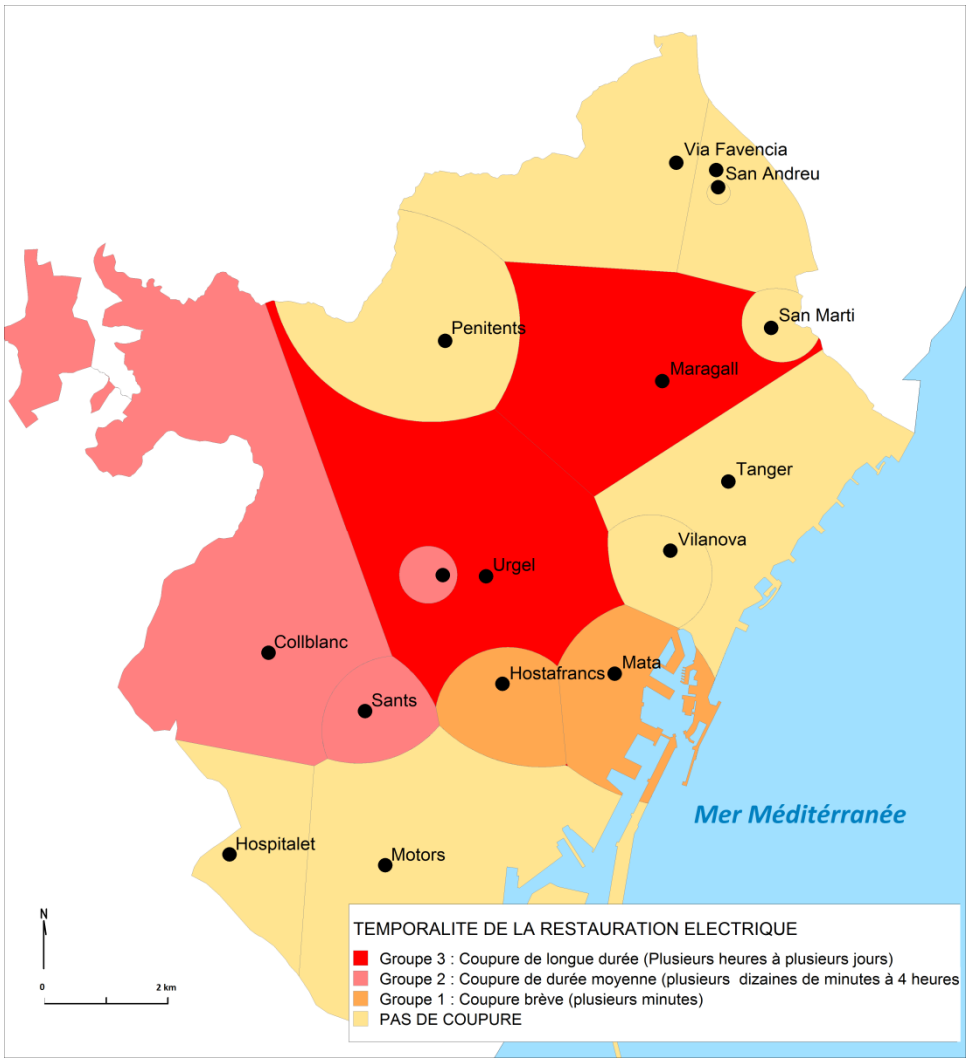


Figure 62 : Restauration progressive du fonctionnement des postes électriques au cours de la crise (0% indisponibilité totale - 100% état normal).

La dynamique de restauration des postes électriques impactés fait ressortir trois groupes de dynamiques temporelles (figure 62).

Le groupe 1 est composé des postes 110kV de Mata et Hostafrancs, se caractérise par un temps de coupure très bref, de l'ordre de quelques minutes. Le groupe 2, composé des postes 110kV Les Corts, Sants et du poste Collblanc 220kV, correspond à un temps de coupure allant de 1 à 4 heures. La restauration de ces postes débute après celle du groupe 1. Le poste de Collblanc à l'origine du déclenchement du système de risques appartient à ce groupe. Le groupe 3 se distingue le plus clairement, d'abord le déclenchement de la panne pour ce groupe est plus tardif et intervient quelques secondes après celui des autres postes. Mais c'est surtout la durée de l'indisponibilité des postes de 220 kv Urgel et Maragal qui en font un groupe atypique et à enjeu dans notre analyse, puisque les deux postes mettront plusieurs dizaines d'heures à retrouver un approvisionnement électrique normal. Par ailleurs, on peut souligner que le poste de Maragal dont le délai de restauration est le plus important, est le seul poste de transformation endommagé physiquement de manière importante dans le système de risques

.

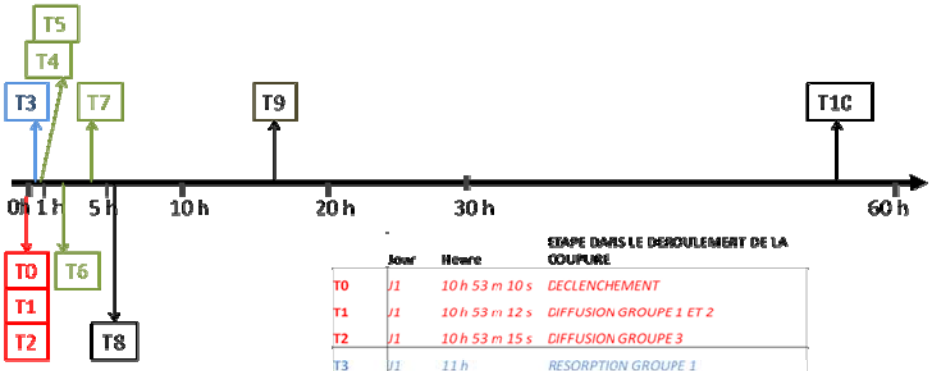


Carte 63 : Classification des bassins de dépendance électrique en fonction de la durée de la crise, d'après les groupes observés dans la figure 62.

6.4.2. La dynamique spatiale de la coupure J-23

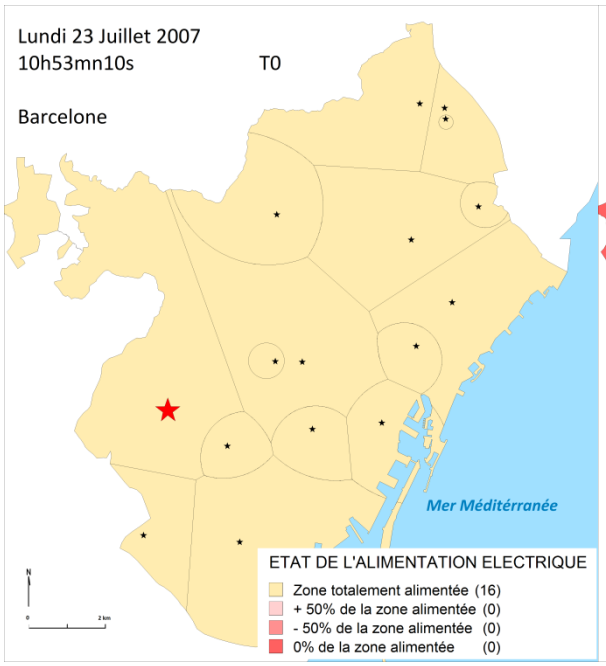
La carte 54 renseigne sur la variabilité spatiale du temps de coupure dans les territoires barcelonais, en fonction de leur dépendance à un poste électrique. La zone centrale de la commune, dépendante des postes de Maragal et Urgel et qui correspond, entre autre, au district de l'Eixample, aux quartiers au sud du district de San Andréu et de Horta-Guinardo identifiés dans la section 2 comme des zones « certainement coupées », apparaît comme la zone plus durablement affectée par la panne électrique. Les zones correspondant au groupe 2 étaient également identifiées dans la catégorie « certainement coupée » dans la section 6.2 (carte 59 et 60) même si des discordances apparaissent, pour la commune d'Espluges de Llobregat en particulier. Les sous-espaces de la catégorie 3, c'est-à-dire ceux qui n'ont été affectés que très brièvement par la coupure électrique, correspondent partiellement à la catégorie « en négatif » dans les résultats de la section 2 (coupure inférieure à 4 heures), toutefois la délimitation construite à partir des polygones de Voronoï semble surestimer la zone ayant subi une coupure très brève.

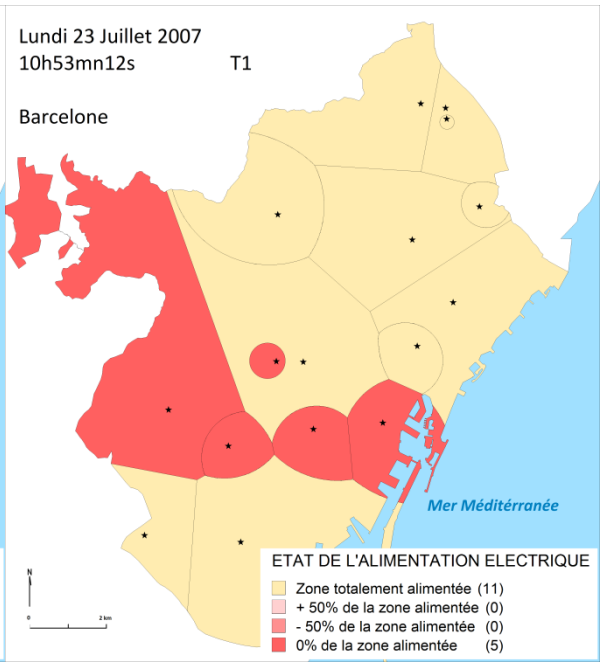
De manière à observer et comprendre plus finement la dynamique de diffusion et de résorption de la coupure électrique, une série chronologique de cartes de la coupure a été produite à partir des informations techniques sur chaque poste électrique et la méthode des tessellations de Voronoï pondérées de manière multiplicative. Dans un souci pratique, d'une carte à l'autre, les pas de temps ne sont pas tous identiques, en effet, si nous avions du représenter la restauration de la coupure (environ 60heures) avec la même précision temporelle que la dynamique de diffusion de la panne (quelques secondes), il nous aurait fallu produire des dizaines et des dizaines de pages de cartes identiques. La figure 63 présente la manière dont les cartes 64 « couvrent » la durée de la crise et propose une sorte de structuration en étapes de la chronologie des évènements du J-23.

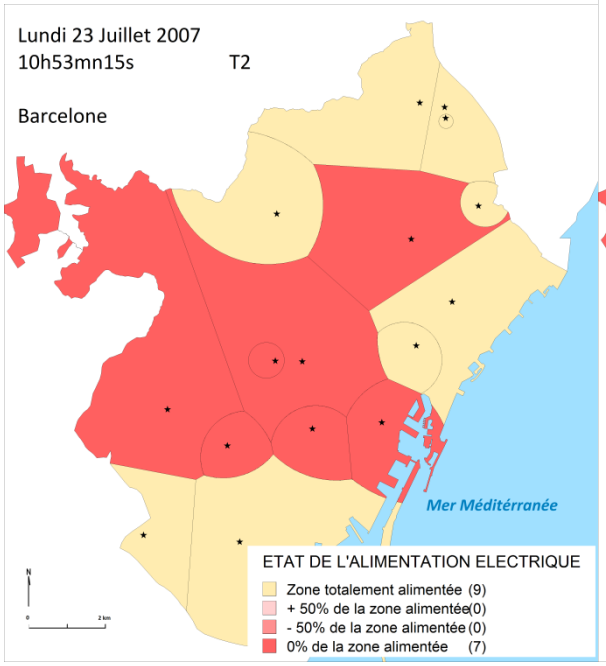


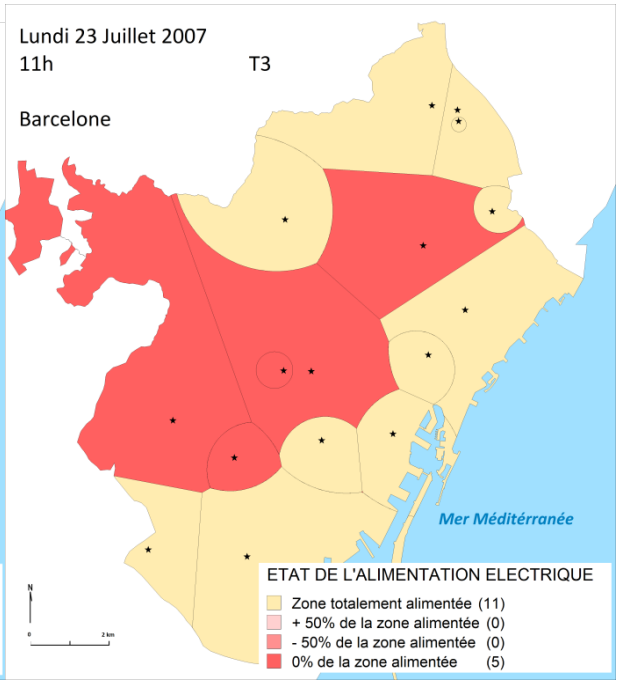
	Jour	Heure	ETAPE DANS LE DEROULEMENT DE LA COUPURE
T0	J1	10 h 53 m 10 s	DECLENCHEMENT
T1	J1	10 h 53 m 12 s	DIFFUSION GROUPE 1 ET 2
T2	J1	10 h 53 m 15 s	DIFFUSION GROUPE 3
T3	J1	11 h	RESORPTION GROUPE 1
T4	J1	11 h 15 m	RESORPTION PARTIELLE GROUPE 2
T5	J1	11 h 25 m	RESORPTION PARTIELLE GROUPE 2
T6	J1	12 h 40 m	RESORPTION PARTIELLE GROUPE 2 et 3
T7	J1	14 h 50 m	RESORPTION TOTALE GROUPE 2
T8	J1	16 h	RESORPTION PARTIELLE GROUPE 3
T9	J2	3 h 24 m	RESORPTION PARTIELLE GROUPE 3
T10	J3	19 h 35 m	RESORPTION GROUPE 3

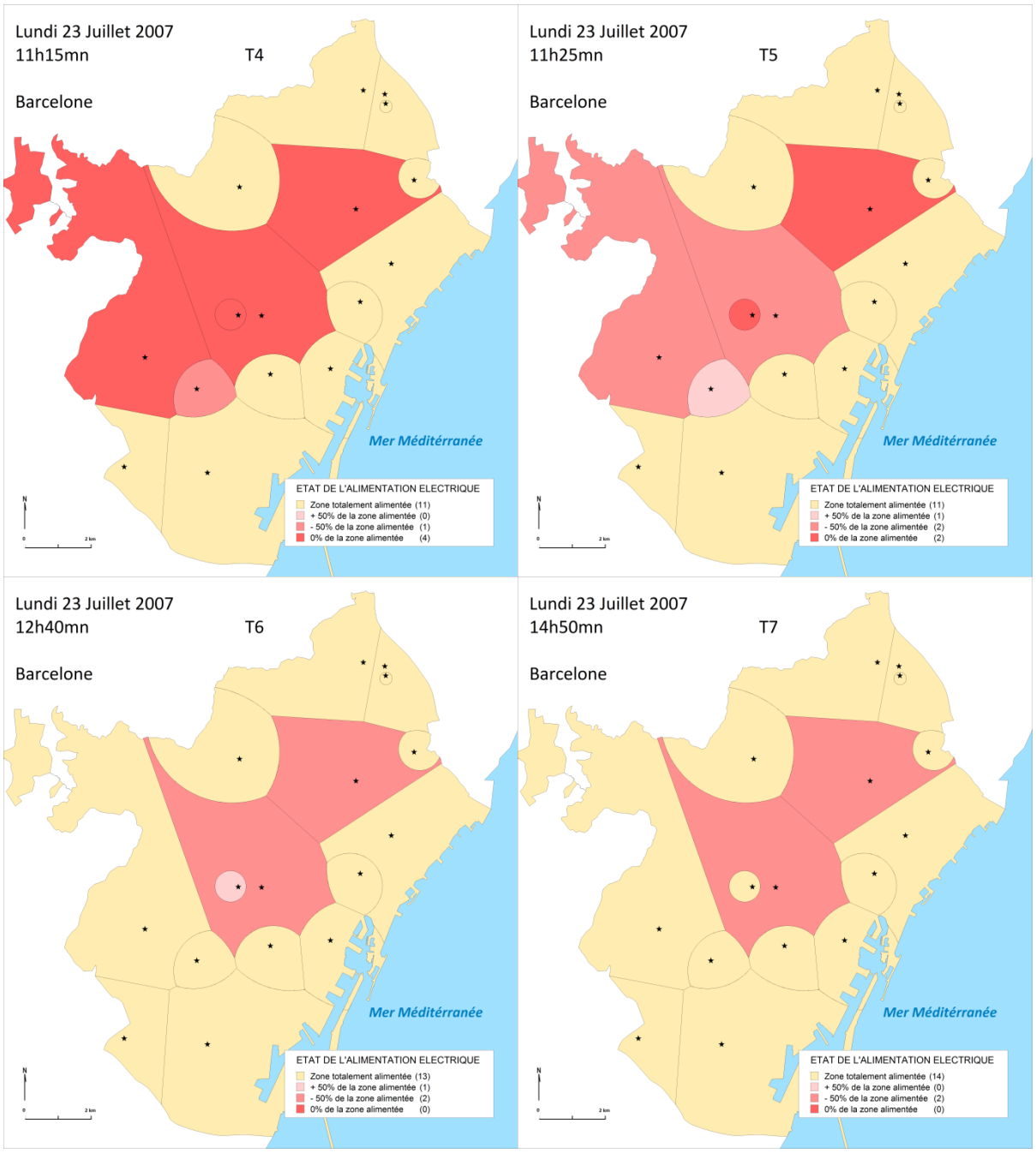
Figure 63 : Restauration progressive du fonctionnement des postes électriques au cours de la crise.

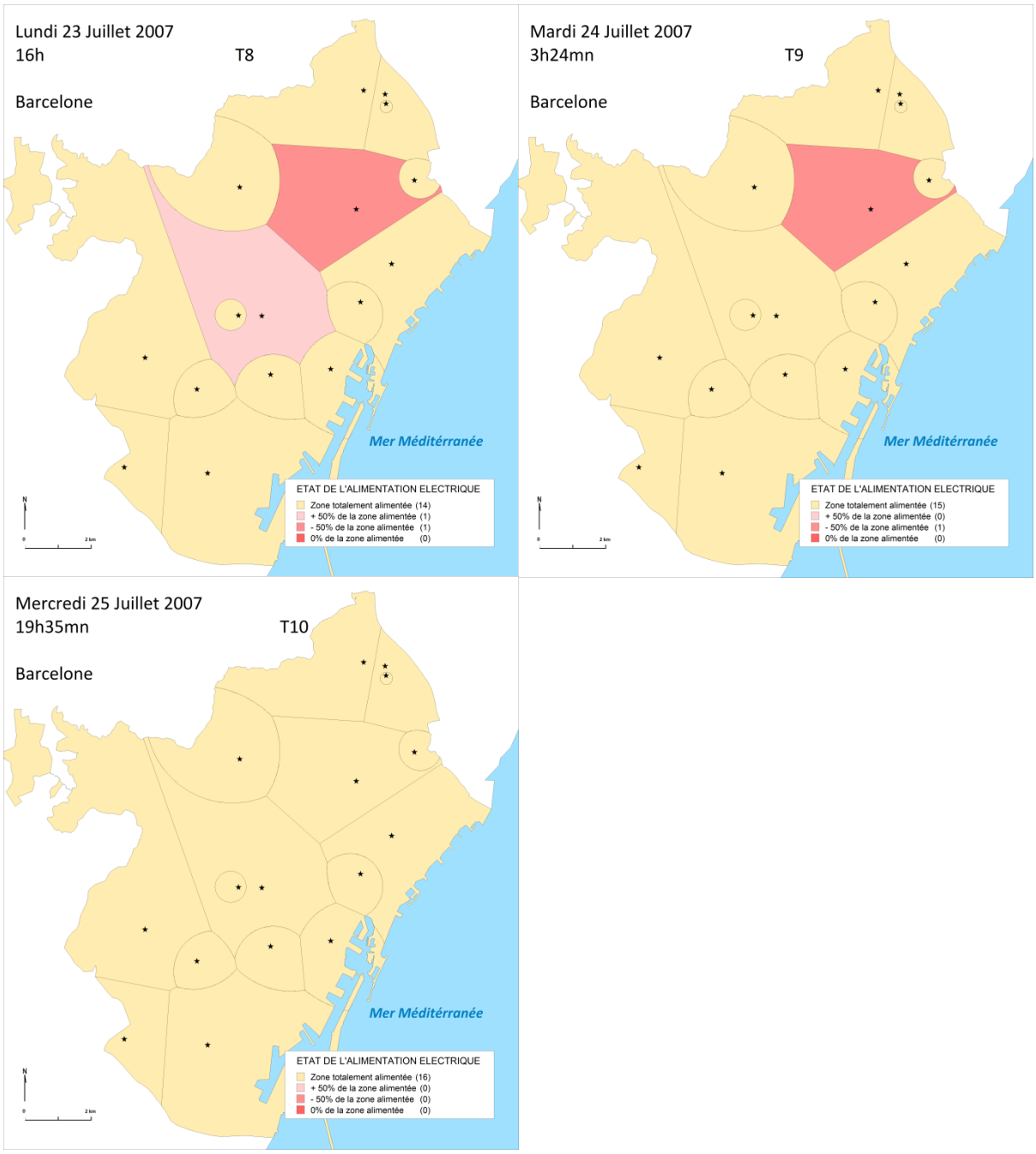

Lundi 23 Juillet 2007
10h53mn10s
T0
Barcelone
Mer Méditérranée
ETAT DE L'ALIMENTATION ELECTRIQUE
Zone totalement alimentée (16)
+ 50% de la zone alimentée (0)
- 50% de la zone alimentée (0)
0% de la zone alimentée (0)


Lundi 23 Juillet 2007
10h53mn12s
T1
Barcelone
Mer Méditérranée
ETAT DE L'ALIMENTATION ELECTRIQUE
Zone totalement alimentée (11)
+ 50% de la zone alimentée (0)
- 50% de la zone alimentée (0)
0% de la zone alimentée (5)


Lundi 23 Juillet 2007
10h53mn15s
T2
Barcelone
Mer Méditérranée
ETAT DE L'ALIMENTATION ELECTRIQUE
Zone totalement alimentée (9)
+ 50% de la zone alimentée (0)
- 50% de la zone alimentée (0)
0% de la zone alimentée (7)


Lundi 23 Juillet 2007
11h
T3
Barcelone
Mer Méditérranée
ETAT DE L'ALIMENTATION ELECTRIQUE
Zone totalement alimentée (11)
+ 50% de la zone alimentée (0)
- 50% de la zone alimentée (0)
0% de la zone alimentée (5)


Lundi 23 Juillet 2007
11h15mn
T4
Barcelone
Mer Méditérranée
ETAT DE L'ALIMENTATION ELECTRIQUE
Zone totalement alimentée (11)
+ 50% de la zone alimentée (0)
- 50% de la zone alimentée (1)
0% de la zone alimentée (4)
Lundi 23 Juillet 2007
11h25mn
T5
Barcelone
Mer Méditérranée
ETAT DE L'ALIMENTATION ELECTRIQUE
Zone totalement alimentée (11)
+ 50% de la zone alimentée (1)
- 50% de la zone alimentée (2)
0% de la zone alimentée (2)
Lundi 23 Juillet 2007
12h40mn
T6
Barcelone
Mer Méditérranée
ETAT DE L'ALIMENTATION ELECTRIQUE
Zone totalement alimentée (13)
+ 50% de la zone alimentée (1)
- 50% de la zone alimentée (2)
0% de la zone alimentée (0)
Lundi 23 Juillet 2007
14h50mn
T7
Barcelone
Mer Méditérranée
ETAT DE L'ALIMENTATION ELECTRIQUE
Zone totalement alimentée (14)
+ 50% de la zone alimentée (0)
- 50% de la zone alimentée (2)
0% de la zone alimentée (0)



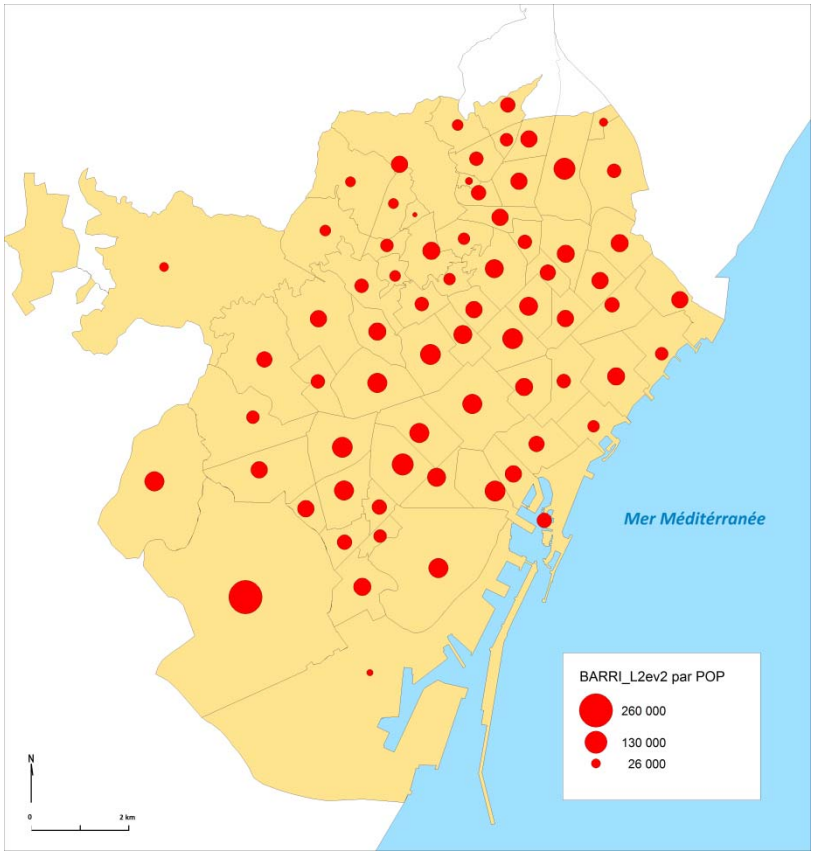
Carte 64 : Diffusion et résorption de la panne électrique dans les évènements du J-23 en fonction des 11 pas de temps définis dans la figure 18.

En nous appuyant sur l'évolution de l'approvisionnement électrique des postes de transformation (figure 62), le découpage des bassins de dépendance des postes et le recensement statistique des populations à l'échelle des quartiers de Barcelone, nous avons simulé l'évolution du nombre de foyers coupés que nous avons ensuite comparée aux données observées. La comparaison entre les données observées et les données simulées sur le nombre de foyers touchés va nous permettre d'évaluer la vraisemblance des découpages obtenus avec les tessellations de Voronoï standard et pondérées.

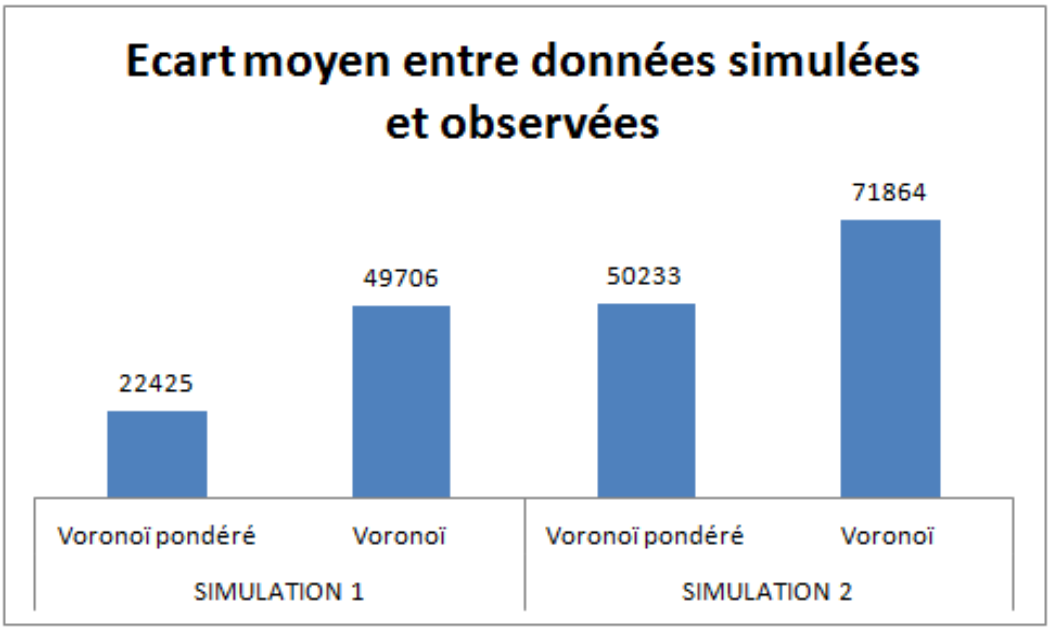
Il s'agit donc de valider la pertinence de la série chronologique de cartes précédentes, en mesurant la concordance de la dynamique morphologique (carte 64) avec l'évolution temporelle du nombre de personnes coupées décrites dans les retours d'expériences.

La méthode peut se décomposer en 4 étapes :

- Estimation des populations à l'échelle des 16 bassins de dépendance, sur la base du recensement des populations à l'échelle des 73 quartiers (carte 65) et d'une règle de répartition des populations proportionnellement à la surface.
- L'état de fonctionnement de chaque poste (exprimé en %) pour 15 points de temps de référence est ensuite croisé à la population de chaque bassin de dépendance obtenue en étape 1.
- Le passage du nombre d'individus au nombre de foyers est réalisé selon deux méthodes. Dans la méthode 1, le nombre de personnes par foyers est calculé de telle sorte que le nombre de foyers coupés au temps t1 soit le même dans la simulation que dans la situation observée. Dans la méthode 2, on considère la statistique officielle selon laquelle les foyers barcelonais sont composés en moyenne de 2.9 personnes.
- Comparaison entre les données officielles et les résultats pour les méthodes 1 et 2 appliquées successivement aux bassins de dépendance obtenus à partir des polygones de Voronoï pondérés et les polygones de Voronoï standard.



Carte 65 : Nombre d'habitants par quartier à Barcelone en 2007 (données Ajuntament de Barcelona).



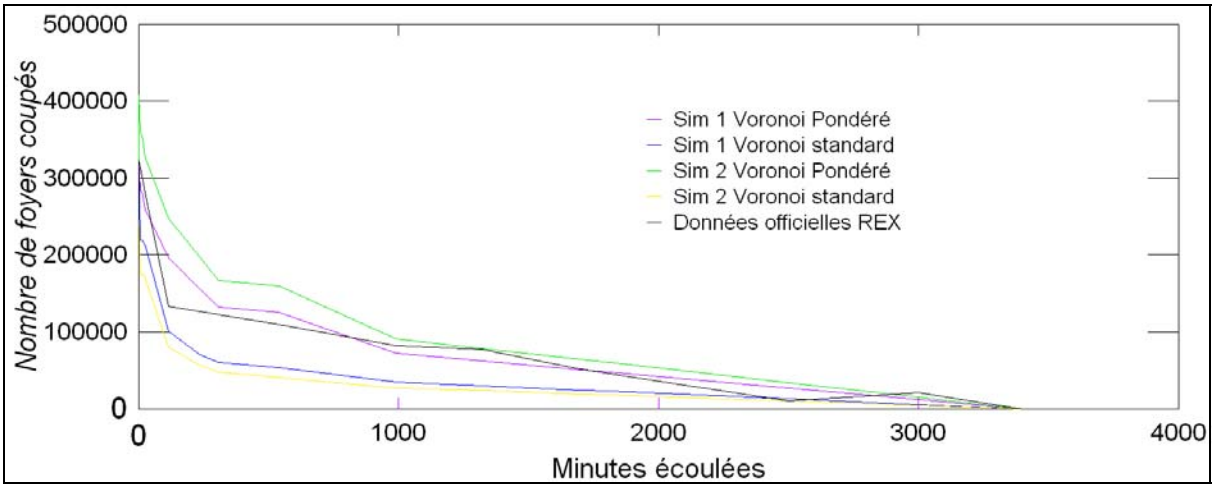


Figure 64 : Comparaison de l'évolution de la population coupée déclarée dans les rapports officiels avec les résultats de l'estimation à partir des polygones de Voronoï standard et pondérés.

La méthode 1 permet assez logiquement de minimiser les écarts moyens entre les données simulées et observées puisqu'elle utilise une donnée exacte comme point de départ de la simulation. Dans les deux cas, les simulations à partir des polygones de Voronoï pondérés obtiennent de meilleurs résultats que celles à partir des polygones de Voronoï standard. Avec la méthode 1 (courbe en violet), l'évolution du nombre de foyers coupés au cours des 53 heures de coupure est reproduite avec une erreur moyenne inférieure à 7% par rapport à la dynamique temporelle de référence, contre une erreur moyenne supérieure à 20% pour celles menées à partir des polygones de Voronoï standard (courbe en bleu) qui ont tendance à sous-estimer le nombre de foyers coupés.

Ce constat semble confirmer les résultats de l'analyse de variance de la partie 3.2 et les limites des polygones de Voronoï standard pour déterminer les bassins de dépendance des postes électriques. D'autre part, soulignons que la relative correspondance entre la dynamique temporelle observée et simulée ne permet pas de valider au sens strict la dynamique spatiale telle que proposée dans la cartes 64 dans le sens où plusieurs dynamiques spatiales pourraient

permettre de reproduire avec plus ou moins d'exactitude l'évolution du nombre de clients coupés.

6.5. LES EFFETS INDIRECTS DE LA COUPURE ÉLECTRIQUE

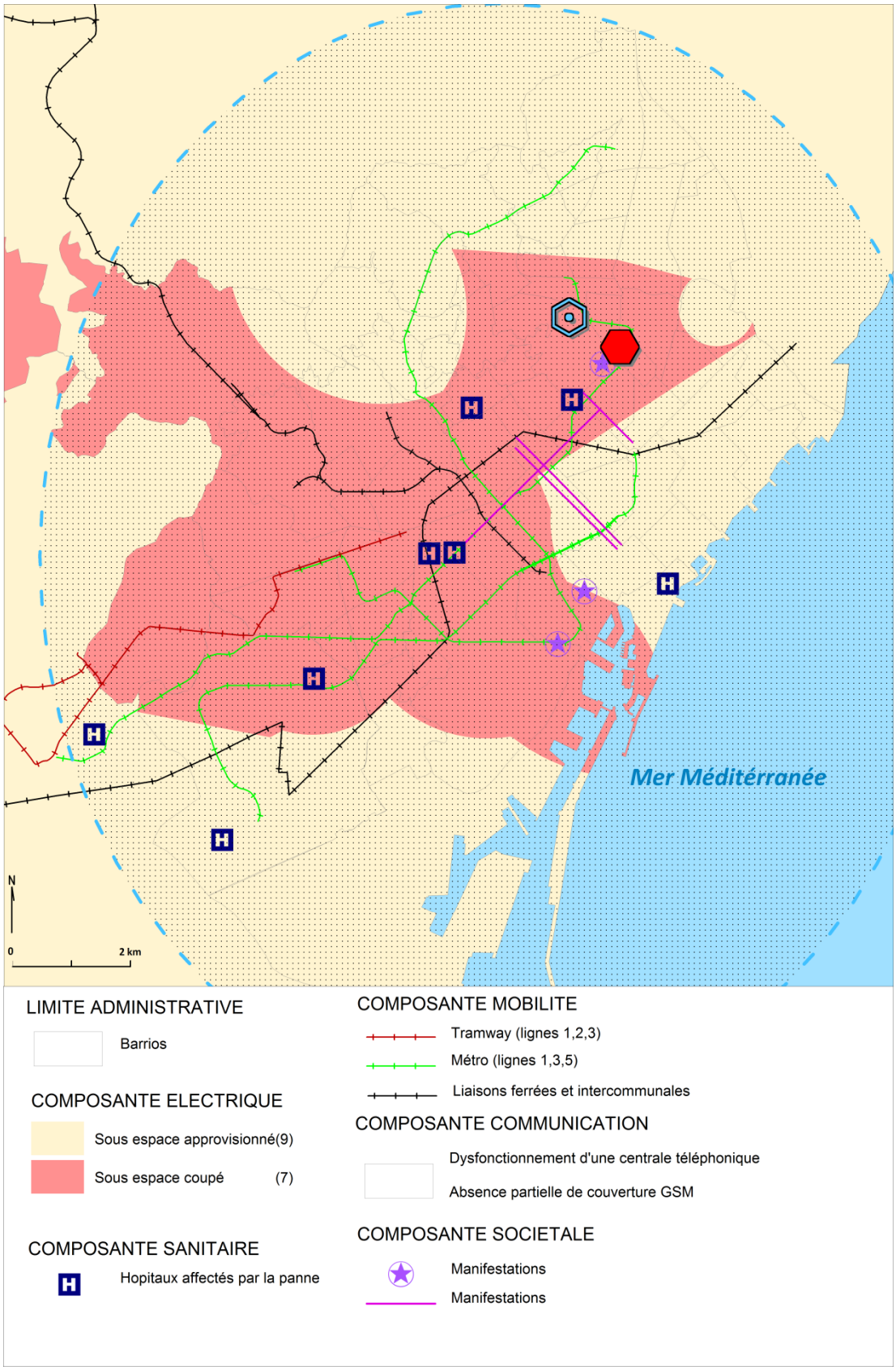
6.5.1. Les effets immédiats et l'interdépendance des réseaux

Notre approche des évènements du J-23 consistait à nous demander dans un premier temps, quels sont les espaces qui n'ont plus disposé d'électricité à un moment ou un autre de la coupure. Ainsi, nous avons obtenu une première différenciation entre les espaces compris dans le périmètre de risque initial et ceux qui ne le sont pas.

Ensuite, nous avons introduit un second niveau de différenciation, en tentant de répondre à la question « combien de temps ces sous-espaces n'ont pas disposé d'énergie électrique ? ». Les territoires les plus durablement non approvisionnés en énergie électrique sont alors considérés comme les plus gravement affectés par la coupure, partant de l'hypothèse simple qu'une coupure électrique qui touche 1 000 personnes pendant 24 heures produit plus de dommages et de pertes que si elle touche 1 000 personnes pendant 10 minutes.

Dans cette partie, nous nuancerons ce point de vue en considérant que la gravité d'une coupure électrique dans un sous-espace n'est pas uniquement fonction de sa durée mais dépend aussi des impacts indirects qu'elle a provoqués, voire même qu'elle aurait pu provoquer. Les impacts indirects ont donc été séparés en trois catégories :

- Les effets immédiats de la coupure concernent principalement les dysfonctionnements avérés des autres réseaux imputables au non approvisionnement d'une composante en électricité. Tous ces effets ne sont pas nécessairement spatialisables.
- Les effets différés de la coupure portent sur les répliques de coupures électriques à Barcelone pendant plusieurs mois après les évènements du 23 juillet 2007, signe d'une fragilisation du réseau électrique à moyen terme ; puis, sur le vaste programme de consolidation du réseau électrique planifié jusqu'en 2016.
- Les effets potentiels concernent des dommages non avérés. Notre question est de savoir, compte tenu de la dynamique spatio-temporelle de la coupure, quels sont les territoires où certains effets dominos particulièrement critiques auraient pu se réaliser.



Carte 66 : Les impacts immédiats de la coupure électrique sur les autres réseaux et sur la société.

Sans reprendre la description menée en 1.2 sur les impacts indirects, il faut préciser que la durée des effets dominos de la carte 77 est de l'ordre de 2 à 3 heures à partir du

déclenchement de la coupure électrique, le 23 juillet à 10h53. Les dysfonctionnements des feux de signalisations n'ont pu être cartographiés, on sait néanmoins qu'environ 60 % des feux tricolores de la ville étaient éteints juste après la coupure (touchant les artères urbaines principales), et qu'environ 20% l'étaient encore le mardi 24 en début de soirée.

La superposition du périmètre de coupure électrique avec la localisation des impacts indirects fait ressortir plusieurs éléments :

- Assez logiquement toutes les lignes ou points d'impacts indirects font partiellement partie du périmètre de coupure.
- les dysfonctionnements de plusieurs lignes de réseaux de transport collectif contribuent à l'extension de la surface de risque initial. De même pour le dysfonctionnement du réseau de téléphonie mobile, même si la zone affectée par la coupure des 200 postes relais n'est pas connue précisément.
- Le mode de diffusion des dommages dus à l'interdépendance des réseaux s'organise en plusieurs étapes : déclenchement de la panne à partir d'un nœud du réseau / diffusion à d'autres nœuds du réseau / zone coupée. Dans cette première zone d'impact, des nœuds d'un autre réseau dépendant du premier peuvent être affectés et produire une nouvelle composante et une nouvelle diffusion du système de risques.

Plusieurs précisions sont nécessaires pour expliquer l'apparition spontanée des « caceroladas » mentionnées dans la première sous-partie. En effet, au-delà de la durée importante de la coupure électrique, plusieurs témoignages soulignent que le manque d'information accessible au moment de son déroulement, a aggravé le mécontentement des populations. D'autre part, la panne a impliqué à la fois, le gestionnaire du réseau de transport électrique (REE) et celui du réseau de distribution (FECSA), qui au lieu d'adopter une stratégie de communication commune, ont débuté leurs communications de crise en se mettant mutuellement en accusation, ce qui a sans doute renforcé l'impression de désordre ambiant.

L'incendie du poste de transformation électrique de Maragal est le seul évènement de nature électrique sur la carte de synthèse. En effet, contrairement aux autres postes impliqués, ce dernier a subi un endommagement physique important qui explique le temps de retour à un état normal plus important que les autres. De plus, même si l'approvisionnement électrique sera rétabli au bout de 53 heures grâce aux nombreux générateurs de secours installés dans sa zone de dépendance, la restauration complète du poste après l'incendie ne sera achevée qu'en 2010**,** et l'approvisionnement électrique de Barcelone restera dans une situation précaire pendant plusieurs semaines après la crise. D'ailleurs, plusieurs coupures électriques, que nous pourrions qualifier de répliques, frapperont à nouveau le territoire barcelonais les semaines suivant la panne du J-23**.** La panne a en quelque sorte aggravé la fragilité du système électrique barcelonais dans le court terme.

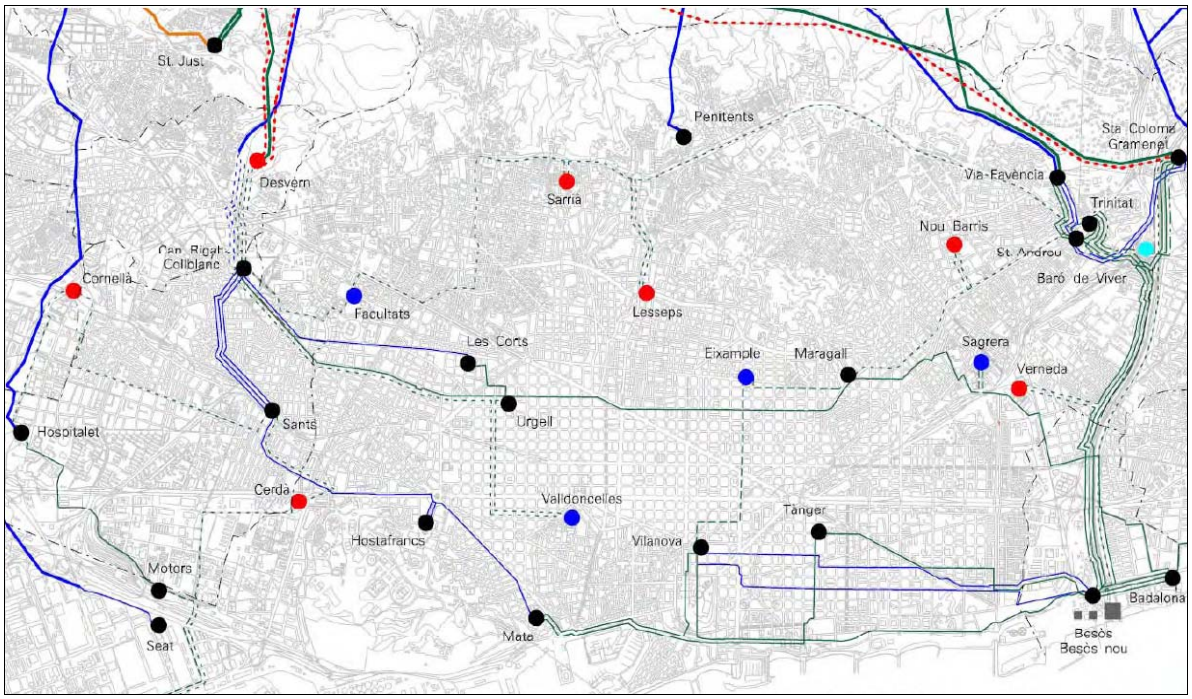
6.5.2. Les effets différés et la transformation durable du système électrique barcelonais

Malgré cette fragilité accrue que l'on peut considérer comme un premier effet différé de la panne, revivre une coupure électrique de cette ampleur aurait été inadmissible pour les populations. De ce fait, pour éviter une nouvelle crise, un vaste programme de consolidation du réseau a été mis en œuvre par le gouvernement catalan ; celui-ci consiste à construire des lignes et postes électriques supplémentaires, de manière à passer de 16 à près de 25 postes sources sur la commune d'ici 2016 et à améliorer le niveau de connexité du réseau de transport électrique. Par un effet indirect et différé, l'évènement possède donc un impact durable sur l'organisation du territoire et de l'approvisionnement électrique de Barcelone. Précisons que cette densification du réseau n'est pas vouée à répondre à une forte augmentation de la demande en électricité à l'échelle de la commune puisque l'ensemble des projections démographiques prévoit une stagnation de la population barcelonaise (source).

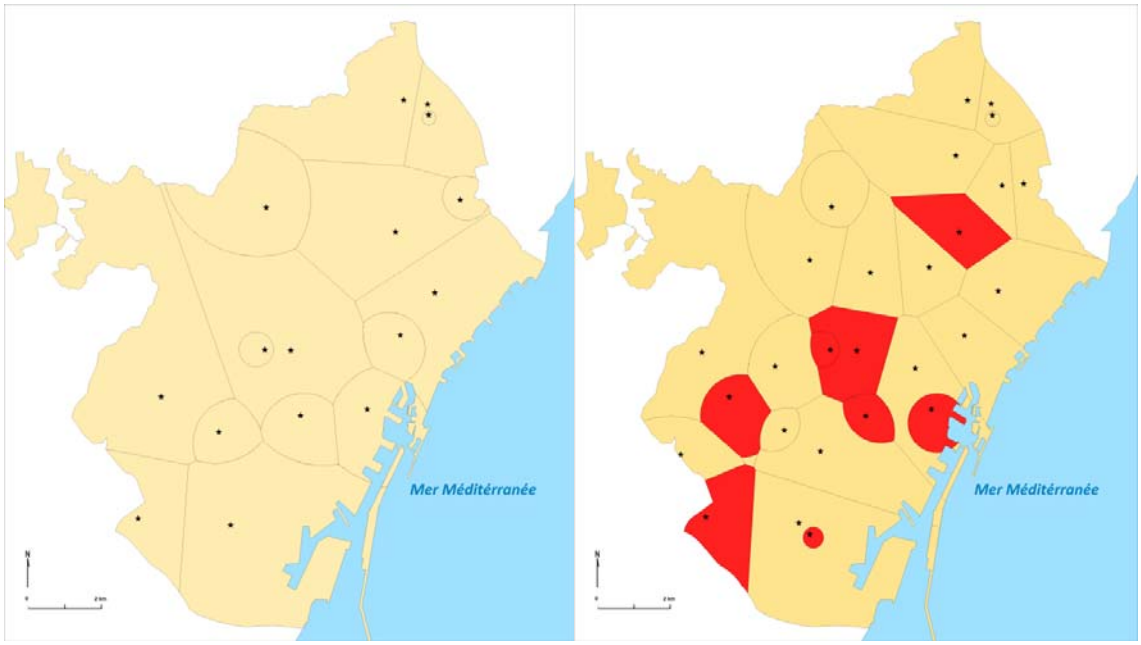
Est-ce à dire que la panne aurait été moins importante si le réseau électrique avait été celui de 2016 ? La carte 68compare la délimitation des bassins de dépendance aux postes électriques, en considérant la répartition des postes de transformation en 2007, puis celle planifiée pour l'horizon 2016. Bien évidemment, les bassins de dépendance sont de tailles moins importantes dans le second cas puisque le système électrique comporte des nœuds supplémentaires. On peut donc penser dans un premier temps, que si exactement les mêmes postes électriques qu'en 2007 dysfonctionnent, le nombre d'habitants barcelonais compris dans leurs bassins de dépendance et le périmètre de la zone de coupure seront forcement moins importants.

Néanmoins, le problème se pose en d'autres termes, car en réalité, les transformations du réseau électrique ne modifieraient pas seulement les périmètres des bassins de dépendance des postes électriques, mais aussi l'ensemble du système de déclenchement du système de risques. Autrement dit, dans la configuration du réseau telle que prévue en 2016, il n'est pas envisageable que l'évènement initial (rupture et chute de la ligne 110 kV du poste de Collblanc) provoque une avarie strictement sur les mêmes postes électriques qu'en 2007. Le maillage du réseau de 2016 devrait par ailleurs permettre d'améliorer la réactivité et les capacités de compensation en cas de pertes d'un ou plusieurs postes et donc limiter la capacité de propagation spatiale et temporelle de l'aléa initial.

Malgré tout, il serait dangereux de considérer que les travaux menés sur le réseau annulent la possibilité d'une nouvelle panne de grande ampleur à Barcelone, à partir de 2016. En effet, dans la mesure où les interdépendances entre les territoires sont conservées voire renforcées, les mécanismes de diffusion d'un aléa restent tout à fait envisageables. De plus, au-delà d'un approvisionnement plus fiable en énergie électrique, la gravité de la panne de Barcelone repose aussi sur la dépendance électrique des réseaux et des populations ; or cet élément n'est pas intégré dans les retours d'expériences ni dans les mesures prises suite à la panne.



Carte 67 : L'implantation de nouveaux postes électriques (en rouge) dans la métropole de Barcelone, telle que prévue pour 2016 (Source : Generalitat de Catalunya, 2010).



Carte 68 : Délimitation des bassins de dépendance aux postes électriques en 2007 et 2016 et projection des espaces coupés si les dommages touchaient les mêmes postes en 2016 que lors de la panne de 2007.

CONCLUSION

Le cas de Barcelone démontre, à nouveau, que même dans des territoires fortement développés, un incident technique mineur peut provoquer des dysfonctionnements importants à l'échelle d'un système urbain et ces dysfonctionnements peuvent persister plusieurs jours dans certains sous espaces.

La dynamique spatio-temporelle de la coupure démontre également une forte différenciation dans la durée de la coupure électrique et permet de distinguer clairement, parmi les espaces coupés, trois sous ensembles.

En termes de gestion de l'imprécision spatiale et factuelle des données relatives à un évènement passé, le chapitre 6 marque un progrès comparativement aux résultats obtenus dans les chapitres 4 et 5. On peut considérer que sur ce point, il est plus conforme au cadre conceptuel et méthodologique proposé dans la première partie de la recherche. D'autre part, grâce à l'utilisation des diagrammes de Voronoï pondérés, il marque aussi, par rapport au chapitre précédent, un progrès en termes de délimitation des bassins de dépendances des postes sources.

Toutefois comparativement au cas Marseillais, nous ne disposons pas de données fines sur la répartition des postes électriques de niveau inférieur à celui des postes sources, de plus le scénario d'endommagement reste plus simple et ponctuel que dans le cas des inondations. Aussi peut-on considérer que le cas de Barcelone, a permis de mettre en œuvre et tester avec un certain succès sur un cas de système de risque «simple », des méthodes qui auraient intérêt à être réappliqués par la suite sur le cas Marseillais afin d'améliorer notre connaissance spatiale de la susceptibilité et optimiser par la suite le croisement avec les résultats sur les propriétés de criticité et de dépendance déjà obtenus.

Nous y reviendrons dans les perspectives de prolongement de cette recherche en conclusion générale.

CONCLUSION GENERALE

Notre hypothèse de départ postulait que le développement des réseaux contribue à aggraver la vulnérabilité des territoires.

Notre conclusion ne permet ni de réfuter, ni d'infirmer cette hypothèse mais nous conduit à la reformuler, pour essentiellement deux raisons, qui nous sont apparues au fil de la recherche, témoignant ainsi d'un changement de perspective sur les systèmes de risques.

D'abord, il nous semble que la propriété RYF « robust yet fragil » incite à concevoir la thématique du risque autrement que dans une logique binaire d'aggravation et de diminution. Certaines formes de la vulnérabilité des territoires se sont aggravées avec la diffusion des réseaux, d'autres ont diminué. De plus, nous avons constaté que la diminution des petites pannes électriques ou la diminution du temps annuel moyen de coupure, pouvait être à la fois le résultat visible d'une amélioration globale de la stabilité des réseaux et le terreau de l'apparition d'évènements de très grande ampleur, tant en termes de portée spatiale que d'impact sociétal, puisque nous avons également observé que l'amélioration globale de la stabilité des réseaux pouvait conduire à renforcer la dépendance et en quelque sorte, faire oublier les risques d'une rupture d'approvisionnement d'une durée importante. Le niveau de complexité possible des évènements générés par les défaillances en cascade des réseaux techniques a, lui, en revanche, clairement augmenté et situe les systèmes de risques associés à leur déclenchement en dehors des cadres de prévisibilité habituelle.

La seconde raison qui nous incite à reformuler cette problématique est liée aux insuffisances du concept de territoire vulnérable auquel nous préférons le concept d'espace à enjeux, moins porteur, à nos yeux, d'une acception « externalisante » du système spatial vis-à-vis du système de risques.

En termes de criticité, il apparaît qu'avec le temps, ont émergé des nœuds, et donc des sous-espaces, dont l'endommagement contribuerait à diffuser le risque avec une portée spatiale plus importante qu'il n'était envisageable par le passé. De même, le caractère central du système technique dans l'équilibre des relations entre l'environnement et la société moderne, conduit également à conclure à une tendance générale à l'augmentation de dépendance territoriale et sociétale aux services et aux biens fournis par les réseaux.

Nos objectifs initiaux consistaient essentiellement en trois points :

- Une formalisation des interdépendances réseaux – réseaux, et réseaux – territoires, qui serve de base à une méthode de détection des espaces à enjeux dans les systèmes de risques, en fonction de différents aléas (naturel, technique ou anthropique) et des trajectoires de diffusion possible des impacts indirects de l'endommagement de différents réseaux techniques.
- Une analyse rétrospective et spatiale d'évènements, où les interactions entre les sous-systèmes environnement, espaces et réseaux déclenchent des évènements à

risques complexes, afin de déceler une éventuelle forme « d'intelligibilité spatiale » dans le déroulement de ces évènements complexes aux allures chaotiques.

- Développer et appliquer une méthode de construction de scénarios de risques et d'effets dominos basés sur l'analyse des interdépendances territoriales afin de mettre en place une simulation de la diffusion spatiale possible des défaillances en cascades de réseaux pour un territoire donné.

Dans le cadre du premier objectif, nous avons eu recours au concept d'espaces à enjeux, que nous avons associé à la démarche SCReD. Des méthodes, adaptées à notre thématique des systèmes de risques, des systèmes multi-niveaux, des effets de réseaux et des espaces à enjeux, mais aussi adaptées à notre contrainte d'imprécision, d'hétérogénéité des données et d'incertitude sur le fonctionnement de certaines interdépendances sont également proposées dans le chapitre 3 de manière à estimer chacune de ces propriétés.

On peut distinguer principalement deux types d'effets des réseaux sur la dynamique spatiale du système de risques :

- une capacité de fragmentation spatiale, dans le sens ou la combinaison d'impacts des réseaux de nature différente est susceptible de révéler par ses effets une différenciation spatiale particulière, très marquée jusqu'à des échelles très fines. Il en résulte une mosaïque de situations à risque dont la morphologie est liée à l'effet structurant des réseaux.
- une capacité d'extension spatiale, avec entre autre, la possibilité sous l'effet des réseaux, de transformer une crise locale en une crise globale, ou plus fréquemment d'intégrer dans le système de risque, des territoires qui n'étaient pas concernés directement par l'aléa de départ.

D'autre part, certaines dimensions temporelles des interdépendances entre les réseaux, et notamment leur capacité de prolongation de la durée des dysfonctionnements ont été présentées.

Dans le cadre du second objectif, nous sommes parvenu à mener des analyses rétrospectives essentiellement évènementielles sur plusieurs territoires d'études (chapitre 4, 5 et 6), pour plusieurs scénarios de systèmes de risques, permettant de tester la mise en œuvre de plusieurs méthodes décrites dans le chapitre 3. Plus brièvement et plus ponctuellement, des analyses ont été menées dans une temporalité plus longue, mettant notamment en évidence la systémogénèse de la fragilité électrique de la région PACA, dans le chapitre 4.

Pour le troisième objectif, nous avons proposé plusieurs démarches susceptibles de s'intégrer dans une approche possibiliste d'anticipation et de simulations spatiales des systèmes de risques à partir des résultats de la démarche SCReD. Néanmoins, cet objectif initial ne reste que partiellement abouti et n'a pas conduit, pour l'heure, à la mise en œuvre d'une méthode de simulation. Cette révision de nos objectifs est en partie liée à l'émergence progressive mais de plus en plus marquée, des enjeux d'incertitude et d'imprécision dans la conduite de la recherche, et en particulier, au décalage entre les données que nous avions imaginées disponibles, et celles avec lesquelles nous avons dû composer.

Cette absence de données fiables et homogènes a été vécue dans un premier temps comme une entrave forte et même, certains mauvais jours, comme un obstacle infranchissable rendant impossible l'aboutissement de cette recherche. Le recueil en continu de nouvelles données sur les réseaux électriques ou sur les processus d'endommagements, les lettres et mails sans réponses ou les refus de transmettre certaines informations nous ont donné parfois le sentiment de courir après le vent. Nous avons même pensé, un moment, qu'il était peut être imprudent et déraisonnable d'engager une recherche sur une telle problématique sans être sûr de disposer de données fiables pour pouvoir la traiter.

Cette logique de placer les données en amont de la recherche et donc, contraindre le choix d'un sujet de recherche « abordable » en fonction de la qualité et de la quantité des données disponibles pour le traiter, nous paraît, aujourd'hui, être à la fois une facilité et un piège. Elle conduit d'une part, à négliger des sujets dont on sait qu'ils ont pourtant un intérêt réel, et d'autre part, à multiplier les recherches sur des sujets ou des traitements quasi identiques car tributaires en amont des mêmes bases de données « clefs en main », dont on veut bien nous laisser disposer.

A partir de cette réflexion, nous avons fait le choix de considérer l'obstacle du caractère incomplet, incertain et imprécis des données et de la connaissance des interdépendances territoires-réseaux, non pas comme la limite de cette recherche mais justement comme un de ses intérêts. Il nous conduit à nous interroger sur la manière dont il est possible d'aborder un sujet dans un contexte d'incertitude forte, aggravée par une contrainte de données disponibles, limitées et imparfaites.

La culture du DIY (Do It Yourself) et des bases de données « maison » imprègnent donc la seconde partie de cette recherche. Faute de mieux, il a fallu composer avec des informations parfois approximatives et tenter d'optimiser leur couplage avec d'autres informations qui étaient parfois extrêmement précises et fiables. Cette obligation d'être « débrouillard » ne devait pourtant pas nous conduire à sortir du cadre scientifique et géographique de cette recherche, c'est pourquoi nous avons tenté d'une part, d'établir ce couplage à partir de méthodes de spatialisation rigoureusement définies, et d'autre part, de raisonner sur un plan plus épistémologique sur le caractère scientifique d'une connaissance approximative de certains systèmes complexes.

A d'autres moments, compte tenu du caractère « neuf » de certains aspects de la recherche et de l'importante littérature scientifique très récente sur le sujet, il nous fallut aussi renouveler notre connaissance théorique sur le sujet et réactualiser à la fois l'état des recherches (chapitre 1) mais aussi notre démarche et nos méthodes d'analyse géographique et spatiale des systèmes de risques. De plus, compte tenu du caractère récent des évènements abordés dans la partie 2, certaines informations et données n'ont été disponibles qu'assez tardivement, et même parfois n'ont été diffusées qu'après que nous ayons débuté nos propres traitements. A nouveau, nous avons tenté d'intégrer ces informations « en cours de route », quitte à devoir réadapter nos traitements une nouvelle fois, voire même envisager plusieurs manières de spatialiser les systèmes de risques (chapitre 6).

Nous avons par ailleurs souligné que notre troisième objectif n'était que partiellement abouti, c'est pourquoi, même si elles concluent cette thèse, en tant qu'exercice académique et universitaire, il nous est difficile de considérer ces dernières pages comme une véritable conclusion de la démarche engagée dans cette recherche. Aussi, nous insisterons sur plusieurs perspectives de recherches et étapes indispensables à la mise en œuvre complète de la démarche SCReD telle que présentée en chapitre 3.

Parmi les perfectionnements que nous pourrions apporter aux analyses rétrospective, le cas varois traité en début de partie 2 mériterait, sans aucun doute, un traitement d'une part, à l'échelle du grand sud est, et d'autre part, en intégrant certaines méthodes de traitement de l'imprécision spatiale et du flou présentées au chapitre 3 puis testées au chapitre 6. Pour perfectionner cette application, il s'agirait alors de recommencer autrement et à une autre échelle, la spatialisation des données en intégrant de manière plus explicite l'imprécision spatiale en amont.

Un peu similairement, pour le cas marseillais, nous disposons d'un nombre important et varié d'informations spatiales sur les périmètres inondables et sur les dommages associés à ces inondations. Ces données nous semblent tout à fait adaptées aux traitements par grilles imbriquées, que nous avons déjà pu tester dans le cas de Barcelone sur un système de risques plus simple et avec un nombre de données moins importants.

Par ailleurs, au niveau de cette technique de partition de l'espace qui intervient de manière importante dans notre démarche d'estimation de la criticité (Chapitres 3 et 5), il est important de préciser qu'il conviendrait d'une part, de disposer d'informations sur la charge électrique dans chaque poste (plutôt que simplement le niveau de tension et le type de poste), et d'autre part, de tester davantage, l'influence de différentes techniques de pondération des nœuds sur les résultats obtenus. Pour la criticité et les rapports d'interdépendances spatiales, la méthode de segmentation proposée dans le chapitre 5 est plutôt de type Top Down que Bottom up, nous partons des postes sources pour aller vers le bâti le plus fin. Il serait intéressant de chercher à procéder en sens inverse, en partant non plus du poste pour aller vers les bâtis mais plutôt de partir des bâtis pour remonter vers les postes de rang 2, dans un premier temps, puis de rang 3, dans un second temps.

En termes de modélisation spatiale, une présentation plus détaillée et formalisée de l'organisation des bases de données construites, dans le cadre des chapitres 4, 5 et 6 reste également à produire. Les enjeux méthodologiques relatifs à la gestion d'informations spatiales floues et approximatives dans les bases de données SIG sont à ce titre particulièrement intéressants à traiter et nécessitent encore des approfondissements.

L'ensemble de ces premières perspectives nous paraît envisageable et réalisable à « court terme». Elles contribueraient à améliorer l'estimation de certaines propriétés dans le cadre de nos applications.

En revanche, pour mener à bien l'ensemble de la démarche SCReD telle que nous l'avions décrite d'un point de vue théorique dans la partie 1, tout en tenant compte de l'imprécision et l'incertitude, de très nombreuses étapes restent encore à mettre en place et à préciser. Le

caractère partiellement inabouti dans la mise en œuvre de cette démarche est donc également lié au caractère partiellement inabouti de la formalisation de cette démarche. Le passage de la logique rétrospective vers la logique anticipative et de simulation des systèmes de risques qui était initialement un de nos objectifs n'est donc pas réalisée pour le moment et ne pourra l'être de manière efficace, qu'après une nouvelle phase de formalisation et de tests qui sort du cadre de cette recherche doctorale.

La quantification possibiliste de l'incertitude, le fuzzy de type 2, qui pourrait permettre d'associer imprécision spatiale et imprécision temporelle d'une information, sont également des pistes de recherches que nous avons présentées et qui demeurent à l'heure actuelle à l'état « de chantier ». Elles nous semblent réellement originales et pertinentes pour nos systèmes de risques mais restent délicates et encore difficiles à envisager de manière opératoire et efficace à court terme.

Malgré son caractère théorique et méthodologique prégnant, cette recherche possède un intérêt opérationnel réel car la démarche proposée permet de produire une connaissance inédite de la fragilité des territoires en fonction des réseaux. Parmi les prolongements indispensables de cette recherche figure alors la question des retombées opérationnelles des avancées de cette connaissance, plus précisément, des modalités de passage des connaissances expertes vers les décideurs et gestionnaires, et de manière plus générale, en direction de la société civile.

ANNEXES

Annexe 1

CONSEIL GÉNÉRAL
Le Var des Territoires
AIRE DRACÉNOISE
HAUT VAR VERDON
FAYENCE
PROVENCE VERTE
VAR ESTEREL
GOLFE DE SAINT-TROPEZ
PROVENCE MÉDITERRANÉE
CŒUR DU VAR

Annexe 2

Communiqués de presse ERDF

mercredi 28 février 2001, 9h00 :

Point sur les intempéries du Var

Dans la nuit du mardi 27 au mercredi 28 février 2001, la région du centre et ouest Var a été touchée par des chutes de neige qui sont à l'origine d'environ 80 incidents haute tension (essentiellement des ruptures de conducteurs par surcharge de neige ou chutes d'arbres) et de nombreux incidents basse tension collectifs et individuels.

70 000 Clients sont actuellement affectés

L'axe St Maximin – Brignoles – Le Cannet a été particulièrement touché

Toutes les équipes EDF sont actuellement à pied d'œuvre pour rétablir le plus rapidement possible ses clients.

mercredi 28 février 2001, 12h00 :

Point sur les intempéries du Var

La situation est en lente évolution car les conditions d'accès aux sites touchés sont particulièrement difficiles.

Tous les moyens terrestres et aériens ont été déployés afin d'établir un premier bilan de la situation.

70 000 Clients sont toujours privés d'électricité.

Les cantons de Rians – Brignoles – Cotignac – La Roquebrussanne – St-Maximin – Barjols – Tavernes – Aups – Le Beausset – Salernes sont principalement touchés.

Les équipes de dépannage d'EDF sont sur le terrain pour réalimenter au plus vite les clients concernés.

mercredi 28 février 2001, 16 h 00

Point sur les intempéries du Var

La situation est en lente évolution car les conditions d'accès aux sites touchés sont toujours difficiles.

Les moyens terrestres et aériens déployés permettent d'établir un premier bilan de la situation.

Le nombre de clients privés d'électricité a été ramené à 55 000, certaines réparations ayant pu être effectuées.

Un renfort de 150 agents en provenance de l'Isère est attendu en fin de journée et en début de matinée du 1er mars.

Un grand nombre de groupes électrogènes de la région bordelaise est acheminé afin de favoriser l'alimentation provisoire d'installations de premières urgences.

mercredi 28 février 2001, 18 h 30

Point sur les intempéries du Var

Malgré les difficultés d'accès rencontrées par nos équipes, des réparations sont d'ores et déjà effectuées et le nombre de clients coupés est passé à moins de 50000.

En complément des 150 agents en provenance de l'Isère attendus en fin de journée, 50 techniciens venus de Nice et Cannes rejoindront nos équipes dès demain matin.

De plus, 100 groupes électrogènes sont acheminés de la région bordelaise et seront installés dès demain dans les communes les plus touchées en espérant l'accès possible.

Conseil de sécurité à l'ensemble de la population : " Nous vous rappelons de ne toucher en aucun cas aux fils tombés à terre et de prévenir le cas échéant la mairie de votre commune avec laquelle nous sommes en liaison permanente ".

Jeudi 1er mars 2001, 8h00

Point sur les intempéries du Var

Les équipes de dépannage ont continué à travailler tard dans la soirée afin de favoriser le rétablissement d'un maximum de clients.

Plus de 35000 clients ont été rétablis dans la seule journée d'hier.

Les groupes électrogènes sont arrivés de la région bordelaise et vont être mis en service dans les points prioritaires.

Les 150 agents EDF, arrivés en renfort, sont déjà à pied d'œuvre sur les régions de Brignoles et de St Maximin et tentent malgré les conditions d'accès toujours difficiles, de rétablir les points les plus touchés.

RAPPEL en matière de sécurité à l'ensemble de la population *: " Nous vous rappelons de ne toucher en aucun cas aux fils tombés à terre et de prévenir, le cas échéant, les services de sécurité ou la mairie de votre commune avec lesquels nous sommes en liaison permanente ".*

jeudi 1er mars 2001

29 000 clients resteront privés d'électricité dans le Var le

jeudi 1er mars 2001 en fin de soirée

En fin de soirée, 29000 clients resteront privés d'électricité dans le Nord Ouest du Var dans une zone allant de Signes à Aiguines. Les communes de Collobrières, Salernes, Rocbaron et Signes sont alimentées à 90 %. Celles de Brignoles, St-Maximin, Cotignac, Aups et Tourves à 80 % .

Deux actions sont menées parallèlement, la première consistant à réalimenter les villes par la mise en place de groupes électrogènes et la seconde en remettant en service des lignes endommagées. Tous les efforts sont déployés pour que demain soir tous les villages du centre Var puissent disposer d'un point d'alimentation en électricité, soit par un groupe électrogène, soit par le réseau.

600 techniciens travaillent au rétablissement de l'électricité avec plus de 250 véhicules, ils sont appuyés par des moyens de transport exceptionnels de l'armée, et 5 hélicoptères. Les équipes se heurtent à des difficultés qui restent très importantes et qui sont dues à l'épaisseur du manteau neigeux.

En liaison avec la cellule de crise de la Préfecture, des interlocuteurs de proximité sont dépêchés dans les communes et les villages pour établir les priorités d'actions.

Plusieurs lignes de transport très haute tension 220 000 et 63 000 volts sont tombées dans la nuit du 27 février au 28 février 2001 et 54 lignes moyenne tension sont hors service.

vendredi 2 mars 2001- 11h00

Objectif : Un point de vie avec une alimentation en électricité avant le week-end

20 communes et 25000 foyers sont toujours privés d'électricité vendredi matin 2 mars 2001.

Des dégâts très importants ont été provoqués sur le réseau électrique par les chutes de neige de la nuit du 27 au 28 février 2001. Plusieurs lignes à très haute tension ont été détériorées.

Le réseau moyenne tension a été le plus touché, avec 64 lignes moyenne tension qui ont été mises hors services.

Vendredi matin les deux tiers des sources d'alimentation par le réseau de la zone nord ouest du Var étaient hors service, cette zone s'étend sur 100 km du nord au sud et d'est en ouest.

1er objectif : apporter un point de vie par village avant le week-end soit par le réseau ou par un groupe électrogène.

2ème objectif : retour à la normale sur la zone pour la fin du week-end.

Cependant, les équipes rencontrent de grandes difficultés dans la région la plus à l'ouest du Var autour de St-Maximin jusqu'au Verdon. Une troisième base travaux est en cours de création sur cette zone, pour renforcer la puissance d'intervention sur cette partie du Var (les deux autres sont situées à Saint-Maximin et à Brignoles).

Toutes les équipes du Var et celles de la Force d'Intervention Rapide d'EDF (FIRE) sont pleinement opérationnelles et montent en puissance avec l'arrivée de nouveaux renforts. Dans la journée ce seront plus de 800 personnes, 300 véhicules, 5 hélicoptères qui seront engagés pour rétablir l'alimentation en électricité des villages du Var.

400 groupes électrogènes sont en cours d'acheminement ou mis en place.

En liaison avec la Préfecture, des interlocuteurs de proximité sont dépêchés dans tous les villages touchés pour établir les priorités d'actions.

Samedi 3 mars 2001- 0h00

95% des communes et villages du Var disposent d'un point de vie, une source en électricité par réseau ou par groupe électrogène le vendredi 2 mars à minuit

La plupart des communes ont pu être reliées à une source d'alimentation électrique dans la soirée du vendredi 2 mars 2001. Les villages de Rians, La Verdière, Rougiers, Saint-Martin, Esparron, Artigues n'ont pu être raccordés, ils le seront dans la matinée du samedi 3 mars 2001.

Les communes de Brignoles, Salernes, Ollières, Aups, Camps la source, Cotignac, Saint-Maximin, Tourves, Pourrières, Seillons, Pourcieux, Barjols retrouvent progressivement une situation normale.

Les équipes rencontrent des difficultés dans la région la plus à l'Ouest du Var autour de St-Maximin jusqu'au Verdon.

Une troisième base travaux a été ouverte à Barjols et une nouvelle Force d'Intervention Rapide d'EDF y arrivera à 8 h 00 samedi.

Toutes les équipes sont mobilisées pour que les habitants du Haut Var retrouvent une situation normale le plus rapidement possible, et avant la fin du week-end.

Ce sont plus de 800 personnes, 300 véhicules, 5 hélicoptères, et 400 groupes électrogènes qui sont engagés pour rétablir l'alimentation en électricité des villages du Var.

Samedi 3 mars 2001- 18h00

Retour à la normale lent et difficile pour l'alimentation électrique dans l'Ouest du haut Var

Chaque commune et village sont reliées à une ou plusieurs sources d'alimentation électrique et disposent d'un ou plusieurs points de vie.

15 000 clients restaient encore privés d'électricité à 18 h 00.

Toutes les équipes sont mobilisées pour que les habitants retrouvent une situation quasi-normale en fin de week-end.

Plus de 800 personnes, 300 véhicules, 5 hélicoptères, et 450 groupes électrogènes sont engagés pour rétablir l'alimentation en électricité des villages du haut Var.

Dimanche 4 mars 2001- 12h00

Retour progressif de l'alimentation en électricité pour les foyers de l'Ouest du haut Var

L'alimentation électrique revient progressivement, hameau par hameau, dans le haut Var. Ce retour est plus lent pour certaines habitations éloignées des villages, pour lesquelles l'alimentation nécessite la reconstruction de plusieurs kilomètres de réseau.

Environ 9 000 clients restaient encore privés d'électricité Dimanche à 12 h 00.

En liaison avec la Préfecture, des interlocuteurs de proximité d'EDF sont présents dans tous les

villages pour établir une communication permanente et déterminer les priorités d'actions municipalité

par municipalité.

Toutes les équipes sont mobilisées pour que les habitants de l'ouest du haut Var retrouvent une situation quasi-normale en fin de week-end. Certains hameaux isolés qui n'auront pas pu être secouru par groupes électrogènes ne retrouveront l'électricité qu'en début de semaine.

1200 personnes, 450 véhicules, 5 hélicoptères, et 650 groupes électrogènes sont engagés pour rétablir l'alimentation des villages du haut Var.

Retour à la quasi normale de l'alimentation en électricité pour les foyers de l'ouest du haut Var cette nuit, certains hameaux très isolés des centres ne retrouveront l'électricité qu'en début de semaine

L'alimentation électrique revient, hameau par hameau, dans le haut Var. Ce retour de l'électricité est plus lent et toujours difficile pour certaines habitations très isolées.

Ce dimanche 4 mars près de 12 000 clients auront été rétablis.

Les équipes resteront en action cette nuit pour que les derniers foyers privés d'électricité retrouvent une alimentation. Cependant, plusieurs centaines d'habitations isolées ne retrouveront l'électricité qu'en début de semaine 3000 clients environ resteront encore privés d'électricité dimanche en soirée.

L'ensemble du dispositif de dépannage exceptionnel mis en place dans le Var restera en action toute la semaine pour consolider le réseau électrique.

1200 personnes, 450 véhicules, 5 hélicoptères, et 650 groupes électrogènes sont engagés pour rétablir l'alimentation en électricité des villages du haut Var.

lundi 5 mars 2001 – 10 h

Retour à la normale de l'alimentation en électricité pour les foyers de l'Ouest du Haut Var

L'alimentation électrique revient, hameau par hameau dans le Haut Var. Ce retour de l'électricité est plus lent et toujours difficile pour certaines habitations très isolées.

Les quelques centaines de clients qui, ce matin, étaient encore privées d'électricité seront rétablies aujourd'hui.

L'ensemble du dispositif de dépannage exceptionnel mis en place dans le Var, restera en action toute la semaine pour consolider le réseau électrique.

1200 personnes, 450 véhicules, 5 hélicoptères, et 650 groupes électrogènes sont engagés pour rétablir l'alimentation en électricité des villages du Haut Var.

lundi 5 mars 2001 – 16 h

Abonnement trimestriel gratuit pour tout foyer toujours privé d'électricité dimanche 4 mars 2001 à minuit, dans les départements du Var, du Vaucluse, des Alpes de Haute Provence et des Bouches du Rhône. La direction d'EDF a décidé d'offrir un trimestre d'abonnement aux clients encore privés d'électricité le dimanche 4 mars 2001 à minuit. Cette initiative concerne les clients abonnés une puissance inférieure ou égale à 36 kVA (kilo Volt Ampère), soit la très grande majorité des particuliers et 90 % des professionnels de la région. Cet abattement concerne près de 3000 clients.

Annexe 3

COMMUNIQUE DE PRESSE
Mercredi 28 février 2001
17h30

Depuis 17h 30, RTE a rétabli la continuité de l'alimentation électrique sur le réseau de transport d'électricité du Sud Est de la France

Depuis mardi 27 février, un phénomène météorologique très exceptionnel de neige collante s'est développé dans le Sud Est de la France entraînant des surcharges sur les lignes du réseau de transport d'électricité et des dégâts sur les lignes et les pylônes.

A 17h 30, le 28 février, le réseau de transport haute et très haute tension, géré par RTE, avait rétabli l'alimentation de l'ensemble des postes de livraison du distributeur EDF dans la région PACA.

Dans la période la plus critique de la journée, le transport d'électricité était interrompu sur 18 lignes de 63 000 Volts et 225 000 Volts. Ce sont en tout environ 300 km de lignes sur un total de 4 000 km de lignes qui ont été affectés, soit 7,5 % du réseau de la zone touchée par les intempéries.

A 17 h30, 12 lignes n'étaient pas remises sous tension dans les zones du Haut Var et du Sud des Alpes de Haute-Provence. Une trentaine de pylônes ont en effet été endommagés suite à une accumulation exceptionnelle de neige sur les câbles électriques, provoquant des surcharges très importantes sur les ouvrages.

Des réparations provisoires ont été entreprises, et RTE a fait appel à des moyens exceptionnels. Le Groupe d'Intervention Prioritaire, dispositif créé après les tempêtes de 99, a été activé, et des renforts d'hélicoptères, de matériels et d'équipes ont été acheminés vers la région afin de réaliser le maximum de réparations possible avant la nuit. Les réparations définitives en ce qui concerne les lignes les plus endommagées s'étaleront sur plusieurs semaines.

Réseau de Transport d'Electricité (RTE), créé le 1er juillet 2000, entité indépendante au sein d'E.D.F., a pour mission d'exploiter le réseau de transport d'électricité haute et très haute tension alimentant les distributeurs d'électricité (E.D.F., Régies autonomes et Distributeurs non nationalisés). Ce réseau comporte 100 000 km de lignes de tension comprise entre 63 000 et 400 000 Volts.

Contacts Presse :
Olivier PERDRIZET : 04 91 30 96 21 à MARSEILLE
Agnès BADER : 01 41 02 16 78 à PARIS

28.2.2001

Réseau de Transport d'Electricité

Neige collante et lignes électriques

La neige dite « collante » a la propriété d'adhérer fortement aux objets ou surfaces qu'elle rencontre, par un phénomène de capillarité. L'accumulation qui en résulte peut conduire à surcharger considérablement les câbles des lignes électriques.

Du fait de la température légèrement positive, les cristaux de neige se transforment en grains de glace entourés d'eau. Lors d'une précipitation de neige collante, les flocons commencent par se déposer de manière dissymétrique sur les câbles. Cette surcharge entraîne la torsion des câbles qui, rapidement, se couvrent d'un manchon de section quasi-circulaire.

On observe, au plan météorologique, que la neige collante est souvent associée à des zones de basse pression.

Conséquences de ce phénomène sur les lignes électriques

Ce phénomène, bien que relativement peu fréquent, est pris en compte dans le dimensionnement normal des lignes électriques ; et des zones à risque sont identifiées par RTE.

Les hypothèses les plus contraignantes ont conduit à retenir des surcharges maximales ne dépassant pas 5 Kg/mètre, correspondant à des manchons de neige d'une épaisseur de 4 centimètres.

En l'espèce, les valeurs ont été largement dépassées. On a observé ce jour des manchons de neige de 15 centimètres.

Les dispositifs de protections existants

Ils sont de deux ordres :

- des **contrepoids** anti-giratoires pour les câbles électriques, et pour les conducteurs en faisceaux,

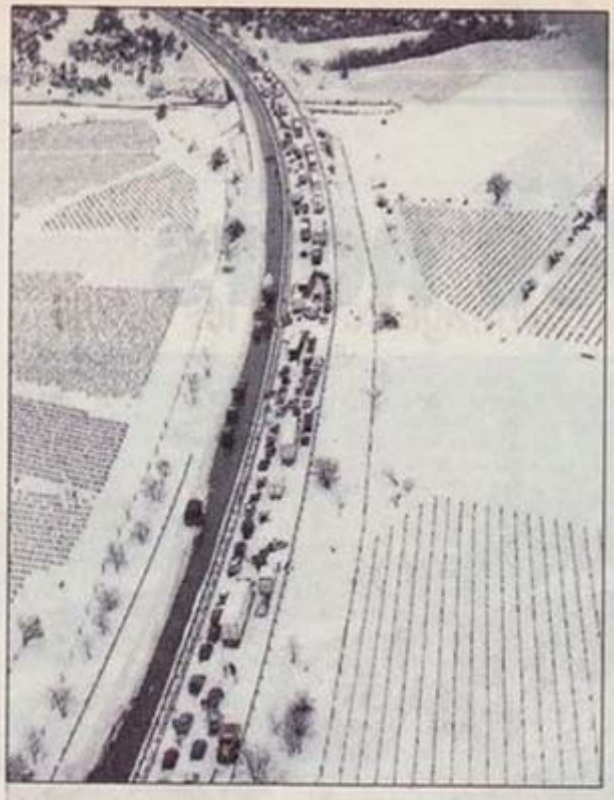
- des **entretoises**, qui limitent naturellement la rotation des câbles électriques, lorsque ceux-ci sont montés en faisceaux,

Ces dispositifs visent tous à éviter la torsion des câbles en combattant la formation des manchons cylindriques, le dépôt de neige ne se produisant alors que sur l'un des flancs du câble et ne pouvant dépasser dès lors un certain développement. Le manchon de neige se détache alors sous son propre poids.

Annexe 4

Coupure de presse : Var-matin

Jeudi 1er mars : « Var :l'enfer blanc »



Autoroute bloqué, automobilistes piégés, véhicules abandonnés, foyers dans l'obscurité, villages sans eau, maisons sans chauffage, téléphones coupés : en une nuit mal anticipée malgré les prévisions météo, la tourmente de neige a paralysé le département, brouillé les communications, piégé les hommes.

Une longue nuit blanche à attendre dans l'anarchie et la tempête des secours qui n'arriveront qu'avec le jour dans quarante centimètres de neige.

Hier soir, au terme d'une journée de crise et sur fond de polémique entre les tenants de l'incivisme et ceux de l'incurie, la tendance était à l'accalmie.

Aujourd'hui, Var-matin a modifié sa présentation pour retracer, en images, le film complet de l'événement et, en textes, le récit complet des intempéries.

Annexe 5

Questionnaire pluridisciplinaire dans le cadre du projet

Risque Décision Territoire

Questions réservées aux personnes ayant vécu une inondation

Q12. Où avez-vous subi les conséquences de cette/ces inondations ? *Je vais vous citer différents lieux et au fur et à mesure vous me direz si oui ou non vous avez subi les conséquences des inondations dans ces lieux.*

	Oui	Non	Année (s)
30. Sur votre lieu de travail			31.
32. A votre domicile actuel			33.
34. A votre précédent domicile			35.
36. Lors de vos déplacements			37.
38. Dans l'établissement scolaire de vos enfants			39.
40. Sur un lieu de loisir, de vacances			41.
42. Autre			43.

Q13. Lors de cette/ces inondations, avez-vous subi dans votre logement des coupures :

	Oui	Non	Ne s'en souvient pas	Date de l'inondation	Durée de la coupure : 1 : *Quelques heures ou moins* 2 : *Une journée* 3 : *Plusieurs jours* 4 : *Ne sais plus*
44. Coupure d'électricité				45.	46. 1 2 3 4
47. Coupure de gaz				48.	49. 1 2 3 4
50. Coupure d'eau				51.	52. 1 2 3 4
53. Coupure de téléphone				54.	55. 1 2 3 4

Q14. Lors de cette/ces inondations, les coupures d'électricité ont-elles affectées dans votre quartier :

	Oui	Non	Ne s'en souvient pas	Date de l'inondation	Durée de la coupure : 1 : *Quelques heures ou moins* 2 : *Une journée* 3 : *Plusieurs jours* 4 : *Ne sais plus*
56. L'éclairage public				57.	58. 1 2 3 4
59. Les feux de signalisation				60.	61. 1 2 3 4
62. Autre				63.	64. 1 2 3 4

Annexe 6

Coupure de Presse sur l'Apagon de Barcelone

FARO DE VIGO
Miércoles, 9 de julio de 2008

Fecsa-Endesa y Red Eléctrica, multadas con 21 millones por el apagón de Barcelona

La Generalitat culpa a las compañías de la avería por falta de mantenimiento de las instalaciones ≫ El fallo afectó a más de 320.000 usuarios en julio del pasado año

Europa Press / BARCELONA

La Generalitat ha impuesto una sanción de 10 millones de euros a Fecsa Endesa y de 11 millones a Red Eléctrica de España (REE) por el apagón que afectó a Barcelona durante varios días el pasado mes de julio de 2007, según confirmaron las compañías eléctricas.

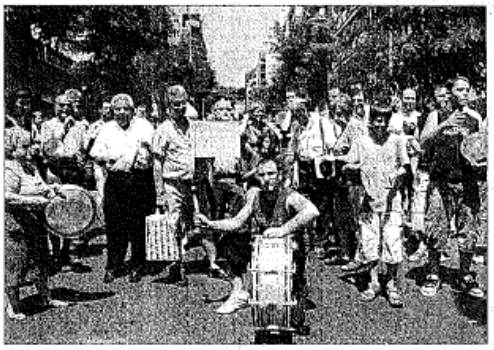
El apagón afectó a 323.337 usuarios de Barcelona y ciudades colindantes y la Generalitat abrió expediente sancionador tanto a REE como a Fecsa Endesa por su responsabilidad en el incidente, en ambos casos por falta de mantenimiento de sus instalaciones.

El expediente sancionador podría haber supuesto una multa económica de entre los 600.000 euros y los 30 millones de euros, tal y como marca la normativa, pero finalmente ha quedado en un total de 21 millones.

Fecsa Endesa pagó a 80.000 afectados particulares que se quedaron sin luz y reclamaron a la compañía compensaciones, con indemnizaciones que sumaron 10 millones de euros, repartidos en pagos a cada usuario que oscilaron entre los 60 y los 300 euros, dependiendo del tiempo que el afectado permaneció sin suministro y del número de personas que habitaban en la vivienda. La media fue de 125 euros.

Por su parte, Endesa destinó a 450 personas para realizar los trámites con el fin de compensar a los afectados por el apagón, aunque destacó que se trataba de un "adelanto" mientras se determinaba "quién debería pagar" las indemnizaciones.

Según el informe que elaboró la Comisión Nacional de Energía (CNE) sobre el apagón, los clientes que se quedaron sin suministro eléctrico debido a la avería en el cable de 220 kV fueron 20.455 más que los afectados por la avería del cable de 110 kV. Del total de 323.337 usuarios afectados, 171.896 dependían del cable de 220 kV (propiedad de Red Eléctrica de España), mientras que 151.441 lo hacían del de 110 kV (propiedad de Fecsa Endesa).



Cacerolada de protesta por los apagones de Barcelona, en julio de 2007. / EFE

El informe de la CNE también desglosó los afectados por municipios: 268.613 en Barcelona, 49.988 en L'Hospitalet de Llobregat y 5.736 en Esplugues de Llobregat.

Tras conocer la propuesta de sanción, Fecsa-Endesa recurrirá y Red Eléctrica de España (REE) todavía no se pronuncia, según explicaron ambas compañías.

Recurso

Fuentes de Fecsa Endesa calificaron la multa de "cantidad excesiva" y lamentaron que el reparto entre las dos empresas implicadas "no es equiparable al número de afectados que recogían los expedientes informativos", por lo que presentará alegación a la propuesta, para lo que cuenta con 15 días desde ayer, tras los que el Govern decidirá la sanción definitiva. Las mismas fuentes añadieron que se debe "tener en cuenta" el "esfuerzo inversor" de la compañía, que en el último año ha destinado 100 millones a Barcelona.

Mientras, fuentes de REE afirmaron no tener "constancia oficial" de la propuesta de sanción, por lo que declinaron pronunciarse al respecto.

Annexe 7

EXTRAIT PREMIERE ETAPE RECUEIL DE DONNES SUR COUPURE ELECTRIQUE BARCELONE.

ID	NOM	ECHELLE	LOCALISATION FLOUE	EXP LOC FLOU	CITATION
1	Baix Guinardó	Barrio	PAS DE PRECISION		Trece barrios fueron afectados, en los que residen unas 130.000 personas y son los de Congrés, Navas, Camp de l'Arpa, Clot, Baix Guinardó, Gui
2	Bonanova	Barrio	QUANTIF FLOU	hasta	desde el barrio del Raval hasta el de la Bonanova
3	Camp de l'Arpa	Barrio	PAS DE PRECISION		Trece barrios fueron afectados, en los que residen unas 130.000 personas y son los de Congrés, Navas, Camp de l'Arpa, Clot, Baix Guinardó, Gui
4	Can Baró	Barrio	PAS DE PRECISION		Trece barrios fueron afectados, en los que residen unas 130.000 personas y son los de Congrés, Navas, Camp de l'Arpa, Clot, Baix Guinardó, Gui
5	Can Vidalet	Barrio	PAS DE PRECISION		a los barrios de Esplugues de Can Vidalet, la Plana y el Centre
6	Clot	Barrio	PAS DE PRECISION		Trece barrios fueron afectados, en los que residen unas 130.000 personas y son los de Congrés, Navas, Camp de l'Arpa, Clot, Baix Guinardó, Gui
7	Congrés	Barrio	PAS DE PRECISION		Trece barrios fueron afectados, en los que residen unas 130.000 personas y son los de Congrés, Navas, Camp de l'Arpa, Clot, Baix Guinardó, Gui
8	El Carmel	Barrio	PAS DE PRECISION		Trece barrios fueron afectados, en los que residen unas 130.000 personas y son los de Congrés, Navas, Camp de l'Arpa, Clot, Baix Guinardó, Gui
9	el Centre	Barrio	PAS DE PRECISION		a los barrios de Esplugues de Can Vidalet, la Plana y el Centre
10	Esplugues	Barrio	PAS DE PRECISION		a los barrios de Esplugues de Can Vidalet, la Plana y el Centre
11	Florida	Barrio	PAS DE PRECISION		los de Pubilla Casas, la Florida y Centre de l'Hospitalet de Llobregat
12	Font del Farga	Barrio	PAS DE PRECISION		Trece barrios fueron afectados, en los que residen unas 130.000 personas y son los de Congrés, Navas, Camp de l'Arpa, Clot, Baix Guinardó, Gui
13	Guinardó	Barrio	PAS DE PRECISION		Trece barrios fueron afectados, en los que residen unas 130.000 personas y son los de Congrés, Navas, Camp de l'Arpa, Clot, Baix Guinardó, Gui
14	Navas	Barrio	PAS DE PRECISION		Trece barrios fueron afectados, en los que residen unas 130.000 personas y son los de Congrés, Navas, Camp de l'Arpa, Clot, Baix Guinardó, Gui
15	Plana	Barrio	PAS DE PRECISION		a los barrios de Esplugues de Can Vidalet, la Plana y el Centre
16	Pubilla Casas	Barrio	PAS DE PRECISION		los de Pubilla Casas, la Florida y Centre de l'Hospitalet de Llobregat
17	Raval	Barrio	QUANTIF FLOU	desde	desde el barrio del Raval hasta el de la Bonanova
18	Salut	Barrio	PAS DE PRECISION		Trece barrios fueron afectados, en los que residen unas 130.000 personas y son los de Congrés, Navas, Camp de l'Arpa, Clot, Baix Guinardó, Gui
19	Vallcarca	Barrio	PAS DE PRECISION		Trece barrios fueron afectados, en los que residen unas 130.000 personas y son los de Congrés, Navas, Camp de l'Arpa, Clot, Baix Guinardó, Gui
20	Vil·la de Gràcia	Barrio	PAS DE PRECISION		Trece barrios fueron afectados, en los que residen unas 130.000 personas y son los de Congrés, Navas, Camp de l'Arpa, Clot, Baix Guinardó, Gui
21	Barcelona	Commune	PAS DE PRECISION		Barcelona
22	Esplugues de Llobregat	Commune	PAS DE PRECISION		Esplugues de Llobregat
23	Hospitalet del Llobregat	Commune	PAS DE PRECISION		se ha restablecido por completo en los municipios de l'Hospitalet del Llobregat y Esplugues del Llobregat
24	Barcelona	Commune	QUANTIF FLOU	casi toda	El corte ha afectado a **unos 350.000 abonados** de casi toda Barcelona y su área metropolitana
25	Gracia	District	PAS DE PRECISION		[Maragall] 80.000 abonados de parte de los distritos de Sant Marti, Sant Andreu, Guinardó, Gracia y del Eixample
26	Guinardó	District	PAS DE PRECISION		[Maragall] 80.000 abonados de parte de los distritos de Sant Marti, Sant Andreu, Guinardó, Gracia y del Eixample
27	Corts	District	QUANTIF FLOU	considerablemente	Esta serie de incidentes, que afectaron cuanto menos a tres subestaciones más, dejaron sin luz eléctrica por un lado a buena parte los distritos del E
28	Ciutat Vella	District	QUANTIF FLOU	excepto	que toda la ciudad se ha visto afectada, excepto en distrito de Ciutat Vella,
29	Eixample	District	QUANTIF FLOU	a buena parte	Esta serie de incidentes, que afectaron cuanto menos a tres subestaciones más, dejaron sin luz eléctrica por un lado a buena parte los distritos del E
30	Gracia	District	QUANTIF FLOU	a buena parte	Esta serie de incidentes, que afectaron cuanto menos a tres subestaciones más, dejaron sin luz eléctrica por un lado a buena parte los distritos del E
31	Guinardó,	District	PAS DE PRECISION		80.000 afectados son de Sant Marti, Sant Andreu, Guinardó, Eixample y Gracia
32	Horta-Guinardo	District	QUANTIF FLOU	a buena parte	Esta serie de incidentes, que afectaron cuanto menos a tres subestaciones más, dejaron sin luz eléctrica por un lado a buena parte los distritos del E
33	Nou Barris.	District	QUANTIF FLOU	menor medida	Esta serie de incidentes, que afectaron cuanto menos a tres subestaciones más, dejaron sin luz eléctrica por un lado a buena parte los distritos del E
34	Sant Andréu	District	QUANTIF FLOU	menor medida	Esta serie de incidentes, que afectaron cuanto menos a tres subestaciones más, dejaron sin luz eléctrica por un lado a buena parte los distritos del E
35	Sant Gervasi	District	PAS DE PRECISION		[Urgel] parte izquierda del distrito del Eixample y de Sant Gervasi, unos 30.000 abonados
36	Sant Marti	District	QUANTIF FLOU	considerablemente	Esta serie de incidentes, que afectaron cuanto menos a tres subestaciones más, dejaron sin luz eléctrica por un lado a buena parte los distritos del E
37	Sarria-Sant Gervasi	District	QUANTIF FLOU	considerablemente	Esta serie de incidentes, que afectaron cuanto menos a tres subestaciones más, dejaron sin luz eléctrica por un lado a buena parte los distritos del E
38	Sant Pau	Hopital	QUANTIF FLOU	vecina	Soy una vecina de Hospital Sant Pau con c/Indústria. Como cientos de vecinos más, estamos desde ayer sin luz
39	l'Esperança	Hopital	PAS DE PRECISION		hospitales Clínic, de l'Esperança, Sant Pau y Sagrat Cor de Barcelona se vieron obligados a **suspender decenas de operaciones**
40	Clínic	Hopital	PAS DE PRECISION		El corte de luz pudo ser dramático en la red de hospitales. El Hospital Clínic, el Sant Joan de Déu, el Sant Pau, el Hospital de la Esperanza, el Hospi
41	Sant Joan de Déu	Hopital	PAS DE PRECISION		El corte de luz pudo ser dramático en la red de hospitales. El Hospital Clínic, el Sant Joan de Déu, el Sant Pau, el Hospital de la Esperanza, el Hospi
42	Esperanza	Hopital	PAS DE PRECISION		El corte de luz pudo ser dramático en la red de hospitales. El Hospital Clínic, el Sant Joan de Déu, el Sant Pau, el Hospital de la Esperanza, el Hospi
43	Sagrado Corazón	Hopital	PAS DE PRECISION		El corte de luz pudo ser dramático en la red de hospitales. El Hospital Clínic, el Sant Joan de Déu, el Sant Pau, el Hospital de la Esperanza, el Hospi

POSTE ELECTRIQUE BINAIRE | POSTE ELECTRIQUE Taux Restaurat | TERRITOIRE ELECTRIQUE BINAIRE | **TERRITOIRE COUPES ATEMPOREL** | Feuil5

BIBLIOGRAPHIE

ALAIN, 1925, *Propos sur le Bonheur*, disponible en ligne sur, www.classiques.uqac.ca .

ALLEN P., 1991, « Evolutionary models of human systems : urban and rural landscapes as self organizing systems », in LEPETIT B., PUMAIN D., *Temporalités Urbaines*, Anthropos, Paris.

ALLEN T.F.H. & STARR T.B., 1982, "Identifying the scale in community ecology", Hierarchy. *Perspectives for ecological complexity*, University of Chicago Press, p.129-165.

APPERT M., CHAPELON L., 2001, « La vulnérabilité de l'appareil circulatoire urbain: définition et mesures», Cybergéo.

APT J., MORGAN G., *Critical Electric Power Issues in Pennsylvania: Transmission, Distributed Generation, and Continuing Services when the Grid Fails*, Carnegie Mellon Electricity Industry Centre, July 2004, Draft.

ASCHAN-LEYGONIE C., 2000, «Vers une analyse de la résilience des systèmes spatiaux.», *L'Espace Géographique*, tome 29-1.

AURIAC, 1979, *Système économique et espace, un exemple en Languedoc.* Thèse de Doctorat d'Etat de Géographie, Université de Montpellier.

BAK P., 1999, *Quand la nature s'organise*, Flammarion, Paris, 258 p.

BAKIS H., GRASLAND L., 1997, « Les réseaux et l'intégration des territoires, position de recherche », Revue Netcom, vol 11, n°2.

BANOS A., 2006, « Explorer les systèmes spatiaux adaptatifs complexes », in Forum Geographical systems modelling and simulation, en ligne.

BARABASI A., ALBERT R. and al., 1999, "Emergence of scaling in random networks", *Science*, 286: p.509-512.

BARABASI A., and al., 2003, Scale-free and hierarchical structures in complex networks , *AIP Conference Proceedings*.

BARABASI A., BONABEAU E., 2002, "Scale free networks", Scientific American 288.

BARCHI P, MARIE S., SCHOMBURGK S., VINCHON C., 2003, *Cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain de la commune de Barly* (Pas de Calais), rapport final BRGM.

BASSE R.M., 2010, *La LGV PACA dans l'évolution du système territorial transfrontalier Franco-Italo-monégasque : Modélisation géoprospective.* Thèse De Doctorat en Géographie. Université de Nice-Sophia Antipolis.

BAUDELLE G. et REGNAULD H., 2004, *Echelles et temporalités en géographie*, Sedes, Paris, 175p.

BECK U., 1986, *La société du risque, sur la voie d'une autre modernité*, Aubier, Champs Flammarion, 2001.

BERTHO A., 2007, « Anthropologie du présent. », partie du site sur le recensement d'émeutes dans le monde www.alainbertho.com.

BIRCHMEIER J., 2007, "Systematic Assesment of the degree of criticality of infrastructures", *ESREL*, Stavanger Norway, 25-27 juin.

BLAIKIE P., CANNON T., DAVIS I., WISNER B., 1994, *At risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters,* London Routledge.

BOUNEAU C., DERDEVET M, PERCEBOIS J., 2007, Les réseaux électriques au cœur de la civilisation industrielle, Timée Editions.

BRUGIDOU M., CIHUELDO J., MEYNAUD H.Y., et al., 2002 , Tempêtes sur le réseau : l'engagement des électriciens(ne)s en 1999, L'Harmattan, 253p.

BRUNET R., 1995, « La géographie, science des territoires et des réseaux », *Cahiers de Géographie du Québec,* volume 39, n° 108, décembre 1995, p. 477-482.

BRUNET R., 2000, Discussion à la suite d'EPEES, 2000, « L'évènement spatial en débat», *L'Espace Géographique*, tome 29, n°3.

BUNGE M., 1986, *A world of systems treatise on basic philosophy D.,* Reidel Publishing Company 4**.**

BUXTON L., al, 2010, "Modeling interdependencies of critical infrastructure", *Proceedings of New Zeland Society for Earthquake Engineering*, Wellington.

BUZNA et al,. 2009, Topological evolution of high voltage electricity network in french. Journal of critical infrastructure, vol 5.

CARRERAS B-A., NEWMAN D. E., DOBSON I., POOLE A B., 2001,"Initial evidence for Self Organized criticality in a time series of electric power systems blackouts", IEEE Transaction on circuits and systems, 51-9, p. 1733-1740.

CERTU, 2002, *Vulnérabilité des réseaux urbains et gestions de crises, l'exemple de l'inondation de Mars 2001 à Lyon et Mâcon,* éditions : CERTU.

CHAPELON L., 2001, Analyse de réseau par destruction / hiérarchisation des liens, Groupe de travail : « Dynamiques spatiales méditerranéennes et systèmes territoriaux émergents, application à l'arc méditerranéen ». Site internet : www.umrespace.org/pages/ArcMed.html.

CHARRE J., 2003, «Un objet géographique: les territoires à risque, un indicateur: les probabilités», in MABY J. sous la direction de, *Les indicateurs en géographie,* Collection Actes Avignon, n°5.

CHARRE J., 1998, Déclaration de politique scientifique, Programme scientifique 2000 - 2003 de l'UMR ESPACE.

CHASSIN D.P., POSSE C., 2005, "Evaluating the north amercian power grid using Barabasi model", Physica and statistica, mechanics and application, 355.

CHERY JP., 1998, *Modélisation d'un système spatial en zone frontalière franco-suisse, adéquation de la dynamique de système aux problèmes de la différenciation spatiale,* Thèse de Doctorat de Géographie, Université de Grenoble.

CLAEYS C. et al., 2009 , *Mémoires, oublis et réappropriations : le risque inondation dans la basse vallée du Rhône et l'agglomération marseillaise.* . Programme de recherche du RDT « Risque, Décision, Territoire », Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer. Université de la Méditerranée – UMR Espace 2012. 241p.

CLAEYS C., CHALVET M., DEMONTIS C., VOIRON C., DUTOZIA J., 2009, "When public policies demand local populations remember previous flooding: an interdisciplinary research", 9th European Sociological Association Conference: Disaster and social crisis, Lisbonne, Portugal, 3-5 septembre.

CLIFF A.D. & ORD J.K., 1973, *Spatial autocorrelation*, Pion, 172 p.

CLIFF A.D., ORD J., KEITH, J., HAGGET G., VERSEY R., 1981, *Spatial Diffusion: An Historical Geography of Epidemics in an Island Community*, Cambridge University Press, Collection geographical studies

CLOZIER R., 1934, « Le réseau électrique français », *Annales de Géographie*, vol.43, n°242 p.113-125.

COUTARD O. RUTHERFORD J., 2009, "Les réseaux transformés par leurs marges: développement et ambivalence des techniques "décentralisées"", Revue Flux 2009-2/3, n°76-77.

CURIEN N., DUPUY G., 1996, *Réseaux de télécommunications : marchés et territoires*, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.

DAUDE E., 2002, *Modélisation de la diffusion d'inovations par la simulation multi-agents. L'exemple d'une innovation en milieu rural*, Thèse De Doctorat en Géographie, Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse.

DE ROSNAY J., 1977, *Le macroscope : vers une vision globale*, Éditions du Seuil, 295 p.

DE RUFFRAY S., HAMEZ G., 2009, « La dimension sociale de la cohésion territoriale : l'exemple de l'accessibilité des maternités dans la Grande région », *L'Espace géographique*, Belin 2009/4, vol.38, p.328-344.

DECOUPIGNY F., 2000, *Accès et diffusion des visiteurs sur les espaces naturels. Modélisation et simulations prospectives*, Thèse de Doctorat d'Aménagement, Université de Tours.

DESJEUX D. et al., 1996, *Anthropologie de l'électricité : les objets électriques dans la vie quotidienne en France,* L'Harmattan collection, « Logiques sociales », 219p.

DOBSON I., CARRERAS B-A, LYNCH V., NEWMAN D.E., 2004,"Complex systems analysis of series of blackout. Cascading failure, criticality, and self organization", Proceedings Bulk power system dynamics and control VI, 22 au 27 aout 2004, Cortina d'Ampezzo, Italie.

DOYLE J., et al., 2005, "The "robust yet fragile" nature of the Internet", PNAS, 102 (41) 14497-14502.

DUDENHOEFFER, PERMANN M, MANIC M., 2006, “Cims: a framework for infrastructure interdependency modeling and analysis”, Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference ,L. F. Perrone, F. P. Wieland, J. Liu, B. G. Lawson, D. M. Nicol, and R. M. Fujimoto, eds.

DUENAS-OSORIO L, 2007, J. I. CRAIG, and B. J. GOODNO, 2007. "Seismic response of critical interdependent networks.” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. Vol. 36, No. 2.

DURAND-DASTES F., 1984, Systèmes et localisations : problèmes théoriques et formels, *Géopoint 1984*, Avignon.

ELLIS J. FISHER D., LONGSTAFF T., PESANTE L., PETHIA R. (1997). *Report to the President’s Commission on Critical Infrastructure*, Special Report, Software Engineering Institute Carnegie Mellon University, 27 p.

EPEES Espaces Post-Euclidiens et ÉvEnements Spatiaux. « Événement spatial ». *Espace géographique*, tome 29, n°3, p. 193-199. (2000)

FENWICK JW., DOWELL J., 1998, “Electrical substation service area estimation using cellular automata”, Proceeding of the 1999 ACM Symposium on Applied computing, New York.

FERRIER J-P., 1994, Antée 1. La géographie, ça sert d'abord à parler du territoire, ou le métier de géographe, Edisud, Aix en Provence.

FERRIER J-P., 1998, Antée 2. Le contrat géographique ou l'habitation durable des territoires, coll. Sciences Humaines, Payot, Lausanne.

FISHER P., 2010, « Detection land cover change when the cover classes are modelled as Type 2 fuzzy sets », Accuracy Symposium, Leivester, UK.

FISHER P., 2007, “What is where? Type 2 Fuzzy Sets for geographic information”, IEEE *Computational intelligence magazine*, vol.2.

FREEMAN L. et al., 1979, Centrality in valued graphs: a measure of betweenness based on network flow, Social Networks, n°13, p. 141-154.

GALLAND J-P., 2010, “Critique de la notion d’infrastructures critique”, *Revue Flux*, 2010/3, n°81.

GLEYZE JF., 2003, « Fonctionnalité et vulnérabilité des réseaux de transport, le cas du métro parisien », 6èmes rencontres de ThéoQuant.

GLEYZE JF., 2005, *La vulnérabilité structurelle des réseaux de transport dans un contexte de risques*, Thèse de Doctorat en Analyse Théorique et Epistémologique en Géographie, Université Paris 7.

GLEYZE JF., 2005, *La vulnérabilité structurelle des réseaux de transport dans un contexte de risques*, Thèse de Doctorat en Analyse Théorique et Epistémologique en Géographie, Université Paris VII-Denis Diderot.

GOULD P. R., 1997, “Spreading HIV accross america with an air passenger”, in Proceeding of the international symposium of computer mapping in epidemiology and environnemental health.

GOULD P., 1970, “Is statistix inferens the geographical name for a wild goose”, *Economic Geography*, n°46.

GRANOVETTER M., 1973, « *The Strength of Weak Ties* », in, American Journal of Sociology, vol. 78, n° 6.

GREEN H., COLIN H., 1990, *Hazard and vulnerability analysis*. Enfield. England: Flood Hazard Research Centre, Middlesex Polytechnic.

GREEN, COLIN H., 1990, *Hazard and vulnerability analysis*. Enfield. England : Flood Hazard Research Centre, Middlesex Polytechnic.

HAGERSTRAND T., 1953, Innovation Diffusion as spatial process, University of Chicago Press, Chicago.

HEINRICH H.W., 1931, *Industrial Accident Prevention, McGraw*-Hill Book Company, inc., p. 1941 - 488.

HINES P., COTILLA-SANCHEZ E., BLUMSACK S., 2010, “Potential indicators of cascading failure risk in power systems”, en ligne.

HOLLING, C.S., 1973, « Resilience and stability of ecological systems », *Annual Review of Ecology and Systematics*, vol. 4, n° 1.

HOLLING C.S., 1986, “Resilience of terrestrial ecosystems; local surprise and global change”, in Sustainable Development of the Biosphere, W. C. Clark and R. E. Munn, editors. Cambridge University Press.

HOLLING C.S., 1996, “Engineering resilience versus ecological systems”, *Annnual Review of ecology and systematic*, n°4.

HUFF D.L, 1973, “The delineation of a national system of planning regions on the basis of urban spheres of influence”, *Regional Studies* n°7.

KASPERSON X. et al., 1995, *Regions at risk: Comparisons of threatened environments,* United Nations University Press, 585 p.

KLAESSEN L., PAELINK J-H, 1979, “Spatial econometrics”, Saxe House, Franborough.

KOUBATIS A., et SCHONBERGER, J.Y., 2005, Risk management of complex critical systems. *Int. J. Critical Infrastructures,* vol. 1, n° 2-3, p. 195-215.

LAGADEC P., 2003, “Risques, crises et gouvernance : ruptures d’horizons, ruptures de paradigmes”, *Réalités Industrielles, Annales des Mines*, n° spécial : “Sciences et génie des activités à risques”, Mai, p. 5-11.

LAGADEC P., 2005, « Nouvelles menaces et gouvernance, des résistances à dépasser, des chemins à ouvrir », *Gérer et comprendre*, Juin, n°80.

LE BERRE, 1986, « Principes de modélisation de la complexité spatiale », Brouillons Dupont n° 14, p. 121-131.

LE MOIGNE JL., 1999, *La modélisation des systèmes complexes*, In AFCET Systèmes. Dunod, Paris, 178 p.

LIEGEOIS M., ARNOULD P., WICHEREK S., 2005, “Tous vulnérable? Le diagnostic de la vulnérabilité aux aléas de l’érosion : un outil pour l’action collective. », revue Vertigo, vol 6 n°3.

LMSC, 2004, Loi de modernisation de la sécurité civile, Loi n°2004-811 du 13 août 2004. www.legifrance.gouv.fr

M@PPEMONDE, 1993, *Facettes de SIG*, numéro spécial de la revue consacrée aux SIG.

MALET JP., THIERY Y., MAQUAIRE O., PUISSANT, A., 2006, “Landslide susceptibility, vulnerability and risk assessment through GIS procedures : a tentative application in the south french Alps”, *Revue Internationale de Géomatique*, 16.

MARCEAU D., MENARD A., MORENON N., 2008, « Les automates cellulaires appliqués à la simulation des changements d’utilisation du sol : sensibilité à l’échelle spatiale et temporelle », in M. THERIAULT, F. DES ROSIERS (eds), information géographique et dynamiques urbaines, t.1, Hermès, Lavoisier, traité IGAT, Paris, p. 227-251.

MARCHAND JP., 1984, « Atelier formation, stabilité et destruction », *GEOPOINT 84, Système et localisations*, Actes de Colloque, Groupe Dupont, Université d’Avignon.

MATHERON G., 1975, *Random sets and integral geometry*, J.Wiley.

MATHIAN H., SANDERS L., 1993, « Modélisation dynamique et système d’information géographique », Mappemonde 4/1993.

MEDD, 2003, « La prévention des risques naturels majeurs », document de prévention en ligne du Ministère de l’Ecologie et du Développement Durable.

MENDEL J.M, 2004, “Fuzzy sets for words: why type-2 fuzzy sets should be uses and how they can be used”, presented as two-hour tutorial at *IEEE FUZZ*, Budapest, Hongrie.

MENDEL J.M, BOB JOHN R.I, 2002, “Type-2 Fuzzy sets made simple”, IEEE Transactions on fuzzy systems, vol 10, n°2.

MICHEL-KERJAN E., 2000, « Risque à grande échelle dans les systèmes en réseaux, quelques interrogations », Publications du Centre Inter-universitaire de recherche en analyse des organisations (CIRANO).

MICHEL-KERJAN E., 2003, «Risques catastrophiques et réseaux vitaux : de nouvelles vulnérabilités», *Flux*, n°51, p. 6-15.

MICHEL-KERJAN E., 2006, « *Vulnérabilité financière face aux « risques à grande échelle » : la parole est à la première industrie au monde. »,* Responsabilité et environnement, n°43.

MIELLET P., 1992, « Quelques idées sur le lien entre les systèmes d’information géographique et la modélisation en géographie. », *GEOPOINT 92, Modèles et modélisation en géographie*, Actes de Colloque, Groupe Dupont, Université d’Avignon.

MOTEFF J., COPELAND C., FICSHER J., 2003, “Critical infrastructure: what make an infrastructure critical.”, Congressional Research Service, The libraty of Congress.

MU L., 2005, « Composition and decomposition of the weighted voronoi diagram », rencontre du Center for spatiality integrated Social Sciences, CSISS, en ligne, www.csiss.org/events/meetings/ spatial-tools/paper/mu_radke.

NERC, 2010, *High impact, low frequency (HILF) event risk to the north american bulk power systems*, rapport du NERC.

NICOLET et al. 1999, *Pour affronter l'imprévisible, les enseignements de la tempête de Verglas*, Rapport de la commission scientifique et technique chargée d'analyser les évènements relatifs à la tempête de verglas et des évènements survenus du 5 au 9 janvier 1998.

NOVEMBER V., 2006, « Le risque comme objet géographique », *Cahiers de Géographie du Québec*, vol.50, n°14, p.289-296.

OFFNER J-M., 1993, "Les effets structurants du transport, mythe politique, mystification scientifique » Mystification scientifique », l'Espace géographique, n°3, p.233-234.

OFFNER JM., PUMAIN D., 1996, *Réseaux et territoires. Significations croisés*, l'Aube.

OFFNER J-M., 2000, « Réseaux et dynamiques urbaines », dans *La ville et l'urbain : l'état des savoirs,* La Découverte, Paris, p. 137-145.

OKABE A. BOOTS B., SUGIHARA K., 2000, *Spatial tessellations, concepts and application of voronoi diagrams*, Wiley series in probability and mathematical statistics.

OTAN, 2007, «Sécurité énergétique: coopérer pour renforcer la protection des infrastructures énergétiques critiques », Rapport de la Commission d'Assemblée parlementaire de l'OTAN. (En ligne).

PAQUOT T., LUSSAULT M., BODY-GENDROT S. 2000 - *La ville et l'urbain : l'état des savoirs*, La Découverte, Paris, 442 p.

PEDERSON et al., 2006, *Critical infrastructure Interdependency modeling: A survey of U.S. and International Research,* Idaho National Laboratory, 116 p.

PEDERSON P., DUDENHOEFFER P., 2006, Critical Infrastructure Interdependency Modeling: A Survey of U.S. and International Research, Technical Support Working Group, Washington D.C. ximqb Idaho National Laboratory.

PEGUY C.P., 1992, « Les risques naturels majeurs. », Encyclopédie de la Géographie.

PERILHON P., 2000, « Eléments méthodiques d'analyse des risques », *Phoebus*, 12, p. 31-49.

PIMM, S.L., 1984, « The complexity and stability of ecosystems », *Nature* 307 (26).

PLASSARD F., 1997, « Les effets des infrastructures de transport, modèles et paradigmes » in *Infrastructures de transport et territoire*, Burmeister, A., Joignaux, G (dir), L'Harmattan.

PLASSARD F., 2003, *Transport et territoire,* Documentation Française, PREDIT, 97 p.

PUMAIN D., SAINT-JULIEN Th., 2001, *Les interactions spatiales*, Armand Colin, 181 p.

RINALDI S., PEERENBOOM J., M, KELLY T.K., 2001 ,« Identifying, Understanding and Analyzing Critical Infrastructure Interdependencies », IEEE Control Systems Magazine, p. 11–25.

RINALDI, S., 2004, "Modeling and Simulating Critical Infrastructures and Their Interdependencies." *Proceedings of the 37th Hawaii International Conference on System* Sciences. Hawaii.

ROBERT B., 2002, « Etude des risques et des effets domino produits par la défaillance d'un aménagement hydroélectrique », *Congrès annuel de la Société canadienne de génie civil*, 5-8 juin, 10p.

ROLLAND MAY. C., 1987, « La théorie des sous ensembles flous et son intérêt en géographie », *Espace Géographique*, 16-1.

ROLLAND MAY. C., 2001, « Limites, discontinuités, continu: le paradoxe du flou », *L'information géographique n° 2*, Sedes.

ROSAS CASALS M., 2009, *Topological complexity of the electricity transmission network. Implications in the sustainability paradigm*, Phd thesis, Université de Catalogne, Catedra UNESCO de Sostenebilitat, 134 p.

ROSAS M., SOLE R., 2010, "Analysis of major failures in Europe's power grid", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*.

ROSE A. et al., 1997, "The regional economic impact of an earthquake: direct and indirect effects of electricity lifeline disruptions", *Journal of science*, vol. 37, n° 3, p. 437-458.

ROSE A. BENAVIDES J., CHANG S., DONGSOON L. 1998, "The regional economic impact of an earthquake, direct and indirect effect of electricity lifeline disruptions", Journal of regional science, vol 37.

ROSE A., 2006, "*Defining and measuring resilience to disasters"*, Disaster and prevention management, vol. 13.

RTE, 2005, Schéma régional de développement du réseau de transport électrique PACA.

RTE, Réseau de transport d'électricité, « La panne électrique du 4 novembre 2006 questions/réponses », 3p.

SAINT-JULIEN Th., 1975, *La diffusion spatiale des innovations,* Montpellier, édition Reclus, collection Espace, Mode d'emploi.

SANDERS L., 1992, Les modèles dynamiques : intérêts et limites en géographie, Colloque Géopoint 92

SANDERS L., 1992, *Système de villes et synergétique*, Paris, Anthropos, coll. Villes.

SENAT, 2007, Mission commune d'information sur la sécurité d'approvisionnement électrique de la france et les moyens de la préserver.

SERRA J., 2007, "The random spread model" , Proceedings of the 8th International Symposium on Mathematical Morphology, Rio de Janeiro, Brésil, 10-13 octobre, MCT/INPE, vol. 1, p.87-98.

SHACKLE GL., 1967, *Décision, déterminisme et Temps*, Dunod, Paris.

SHINOZUKA M., et al., 2007, "Seismic performance of electric transmission network under component failures". *Journal of Earthquake engineering and structural dynamics*.

SHINOZUKA M., ROSE A., EGUCHI R.T., et al., 1998, *Engineering and Socioeconomic Impacts of Earthquakes—An Analysis of Electricity Lifeline Disruptions in the New Madrid Area,* Monograph Series; n°2. Buffalo, N.Y.: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.

SHINOZUKA, M., DONG, X., 2003, "Seismic Performance Criteria for Lifeline Systems," *8th US Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures against Liquefaction*, Tokyo, Japon, 15-18 décembre.

TALEB N.N., 2008, *Le Cygne noir. La Puissance de l'imprévisible*. Paris : Les Belles Lettres, 496 p.

TALUKDAR S., 2006, "Can Cascading Failures Be Eliminated?" CEIC, Carnegie Mellon University, EPRI-RAC, Mars.

THEYS J., 1987, « La société vulnérable », in THEYS J., FABIANI JL., 1987, (sous la dir), *La société vulnérable, évaluer et maîtriser les risques*, Presses de l'Ecole Normale Supérieure.

THOM R., 1977, *Stabilité structurelle et morphogenèse*, 2e édition, InterÉditions, Paris, 351 p.

UCTE, 2007, « Rapport UCTE sur la panne du 4 novembre 2006 », Union for the co-ordination of Transmission of Electricity.

US, 1998, « The Clinton Administration's policy on critical infrastructure protection: Presidential Decision Directive 63 », May 22 1998

VERMOT DESROCHES, 1994, « Interactions sptiales » in Encyclopédie d'Economie spatiale, concepts, comportements, organisations, AURAY JP, BAILLY A., DERYCKE PH., HURIOT JM., Economica.

VOIRON-CANICIO C., 1992, *Espaces, structures et dynamiques régionales, l'arc méditerranéen,* Thèse d'Etat, Université de Nice Sophia Antipolis.

VOIRON-CANICIO C., OLIVIER F., 2003, « Vulnérabilité de la voirie urbaine face au risque de thrombose en temps de catastrophe », GéoEvènement 2003, Paris.

VOIRON-CANICIO C., OLIVIER F., 2005, « Anticiper à l'aide d'un SIG, les conséquences de la paralysie urbaine en temps de catastrophe : application à la ville de Nice », In *Systèmes d'Information géographique et gestion des risques*, pages 55-58, Paris, ISTED, 101 p.

VOIRON-CANICIO C., OLIVIER F., 2005, « Simulations et détection des espaces à enjeux dans un système urbain, en situation d'inondation », Actes du Colloque International SAGEO 2005, Avignon.

VOIRON-CANICIO C., OLIVIER F., DOMERGUE R., MALLEA P., STACCINI P., 2005, «Spatialisation du risque, anticipation et gestion de crise.», Paris, communication au colloque *Urgence 2005*.

VOIRON-CANICIO C., CHERY JP., 2005, « Espace géographique, spatialisation et modélisation en Dynamiques des Systèmes », 6ème Congrès européen des sciences des systèmes, 19 au 22 septembre 2005.

VOIRON-CANICIO C., 2006, « L'Espace dans la modélisation des interactions Nature-Société », Colloque *Interactions Nature- Société, analyses et modèles*. La Baule.

VOIRON-CANICIO C., DUBUS N., MAIGNANT G., BASSE R., DUTOZIA J., SAINT AMAND P., SEVENET M., PERRIN N., 2007, « L'imbrication des territoires et ses conséquences sur la gestion et la prospective territoriales », *XLIIIè colloque de l'ASRDLF-Les Dynamiques Territoriales*, Grenoble-Chambéry, 16 p.

VOIRON-CANICIO C., DUTOZIA J., 2009, « Contribution géographique au rapport final du projet « Mémoires, Oublis et Réappropriations : Le risque inondation dans la basse vallée du Rhône et l'agglomération marseillaise » », Université de la Méditerranée – UMR Espace 2012, Programme de recherche du « Risque, Décision, Territoire », 34p.

VOIRON-CANICIO C., DUTOZIA J., BASSE R., DUBUS N., MAIGNANT G, SAINT AMAND P., SEVENET M., 2010, « L'imbrication spatiale dans l'analyse des territoires : formalisation, modélisation et simulation. », Revue d'Economie Régionale et Urbaine n° 4.

VOIRON-CANICIO C., 2012, «L'anticipation du changement en prospective et des changements spatiaux en géoprospective », *l'Espace géographique* 2012-2.

WANG J-W., RONG L-L., 2009, "Cascade-based attack vulnerability on the US power grid." *Safety Science*, vol. 47, n°10, p.1332-1336.

WINKLER, T, DUENAS-OSORIO L, al., 2010, "Interface network models for Complex Urban Infrastructure Systems", *Journal of Infrastructure Systems* 4.

ZADEH L., 1965, Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3):338-353.

ZADEH L, 1975, "The concept of linguistic variable and its application to approximate reasoning information science", *Information Science*, vol 8, 9.

ZADEH L., 1978, Fuzzy sets as a basis for possibility, *Fuzzy Sets and Systems* 29.

ZIMMERMAN 2004, *Decision-Making and the vulnerability of interdependent critical infrastructure*, supported by the United States Department of Homeland Security through the Center for risk and economic analysis of terrorism events (CREATE) University of Southern California, Los Angeles, 10 octobre, 7 p.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Probabilités cumulées d'apparition des coupures électriques en Amérique du Nord en fonction de la quantité d'énergie non distribuée. La distribution exponentielle en trait hachuré est adaptée pour les petits évènements mais sous-estime nettement la distribution des évènements de grande taille. (Source : Jay Apt, 2002, à partir des données sur la distribution statistique de 15 années de pannes électriques sur le réseau américain NERC (1984-2000)..... 25
Figure 2 : Effet de seuil dans l'évolution de la taille des coupures électriques en fonction de la charge sur le réseau. (Source : Dobson, Carreras, 2001). 27
Figure 3 : Probabilités cumulées d'apparition des coupures électriques en Europe en fonction de la quantité d'énergie non distribuée, de la perte de charge et du temps de restauration. (Source : Rosas, Solé, 2010). 28
Figure 4 : Le principe d'attachement préférentiel et le développement continu de l'hétérogénéité vers une structure de réseau scale-free..... 29
Figure 5 : Structure et connexité dans les réseaux aléatoires (haut) et réseaux scale free (bas). (Source : Barabasi et al., 2003)..... 30
Figure 6 : Modularité et dimension hiérarchique dans les réseaux scale-free. (Source : Barabasi et al., 2003)..... 30
Figure 7 : Les groupes d'interconnexion au début des années 1930. (Source : Renaud, 1931, cité dans Bouneau et al., 2007)..... 31
Figure 8 : Comparaison du réseau d'interconnexion électrique de l'Est Américain avec des structures théoriques de références. (Hines, 2010). 32
Figure 9 : La vulnérabilité des structures scale-free aux attaques ciblées (Source : Barabasi, Bonabeau, 2002)..... 34
Figure 10 : Géo-référencement des infrastructures et des secteurs critiques de la liste diffusée par Wikileaks (Source : Anonyme). 42
Figure 11 (a) : Courbes de fragilités associant une probabilité d'endommagement des réseaux électriques liée à l'intensité sismique exprimée en fonction du pic d'accélération (PGA) à partir des données du séisme de Northridge de 1994 ; (b): simulation des pics d'accélérations sismiques ; (c) simulation des effets induits en termes d'approvisionnement électrique (Source : Shinozuka et al., 1998)..... 46
Figure 12 : Effets en chaîne consécutifs à l'arrêt de la station d'épuration de Neuville-sur-Saône (Source : CERTU, 2001)..... 52
Figure 13 : Imbrications des réseaux, interdépendances verticales et trajectoires des systèmes de risques (inspiré de la réprésentation de Hagerstrand, 1953, dans Daudé, 2002)..... 54
Figure 14 : Complexification des interdépendances du réseau domestique et aggravation, entre 1970 et 2010, de la dépendance électrique des services téléphoniques et télévisuels..... 56
Figure 15 : La diffusion organisée par les niveaux de la hiérarchie urbaine (Hagget, in Ord Cliff, 1979)..... 71
Figure 16 : Schéma d'analyse de la vulnérabilité d'un système (J. Theys, 1987)..... 73
Figure 17 : La vulnérabilité écologique comme couplage de la sensibilité et de la résilience environnementale (Kasperson et al, 1995). 74
Figure 18 : Concept de cône des futurs possibles d'un système géographique complexe et de trajectoire limitée d'un système géographique complexe (Rolland May, 2001)..... 92
Figure 19 : Imbrication et variabilité de l'imprécision spatiale dans la connaissance de l'aléa (19a) et estimation du niveau de risque d'impact (19b). 98
Figure 20 : Croisement des données sur la densité de nœuds du réseau avec les données sur la perturbation obtenue en figure 19. 99

Figure 21 : Logique de possibilités et de probabilités, l'exemple des œufs au petit déjeuner (Source Zadeh, 1978)..... 101
Figure 22 : Logiques de probabilités et de possibilités appliquées à l'incertitude d'endommagement d'un équipement électrique face à une perturbation sismique. 103
Figure 23 : Courbe de probabilités de dommages obtenues à partir des observations du séisme de Northridge. 104
Figure 24 : Estimation de l'incertitude de l'endommagement dans une logique possibiliste. 104
Figure 25 : Estimation de l'incertitude de l'endommagement dans une logique possibiliste avec introduction d'un niveau d'imprécision supplémentaire (flou de type 2). 105
Figure 26 : Intra et inter incertitudes syntaxiques et la modélisation d'ensemble flou de type 2, l'exemple du mot «some ». (Mendel, 2004)..... 108
Figure 27 : La logique de diffusion dans le modèle Random Spread (Source : Serra, 2007). 110
Figure 28 (a) : Détection des Chemins de Delaunay entre poste de transformation HTA/BT et deux postes de transformation HTB/HTA … 116
Figure 28 (b) : … pour déterminer les interdépendances des postes de niveaux différents et les bassins de dépendance associés aux postes. … 116
Figure 29 : Incertitude des limites de services dans l'automate cellulaire sur les bassins de dépendances électriques (Fenwick, al. 1998). 121
Figure 30 : Réseaux techniques du comté de Shelby et matrice d'interdépendance des réseaux associée (Duenas-Osorio, el. 2007). 126
Figure 31 (a) : Représentation graphique des interdépendances de la matrice probabiliste de la figure 30 et (b) estimation des ratios impactant/impacté des réseaux techniques..... 128
Figure 32 : Courbes de fragilité des réseaux techniques aux perturbations sismiques avec et sans prise en compte des interdépendances entre les réseaux (Source : Duenas-Osorio, 2007)..... 129
Figure 33 : Extrait d'informations associées aux postes source en amont du système électrique dans le cas de Marseille. 133
Figure 34 : Des situations de déséquilibre entre offre et demande d'électricité et l'apparition de déséquilibres de fréquence lors de la désolidarisation du réseau électrique UCTE le 4 novembre 2006. (Source : RTE). 141
Figure 35 : Evolution de la production et de la consommation électriques à l'échelle de la région PACA entre 1960 et 2010 (Données, RTE). 147
Figure 36 : Cascade d'évènements conduisant à partir de la chute d'une ligne basse tension à la coupure électrique d'un million de foyers en région PACA. 152
Figure 37 : Evolution du nombre de clients coupés (en bleu) et évolution du rythme horaire de raccordement de clients pour un agent technique (en rouge) au cours des 120 heures de crises à partir du mercredi matin à 9 heures. 163
Figure 38 : La restauration de l'électricité et le déploiement progressif des services d'intervention EDF avec l'arrivée des renforts des départements de l'Isère et des Alpes-Maritimes..... 165
Figure 39 : Photographie du travail des équipes de secours en provenance de l'Isère partiellement entravé par l'enneigement de la voirie lors de la panne de février 2001 dans le Var (Source : Service de presse ERDF)..... 166
Figure 40 : Photographie de l'arrivée d'un camion grue et d'équipes de secours après le déneigement des voiries routières. (Source : Service presse ERDF)..... 167
Figure 41 : Deux techniciens en plein travaux acrobatiques à plus d'une quinzaine de mètres du sol sur une ligne du réseau de distribution électrique. (Source : Service presse ERDF). 167
Figure 42 : Impacts et interdépendance des réseaux techniques dans le système de risques du 28 février au 4 mars 2001, dans le département du Var..... 168
Figure 43 : Raccordement des nœuds du réseau de distribution publique aux 57 000 nœuds des bâtiments résidentiels. 179

Figure 44 : Vulnérabilité aux inondations des différents types de réseaux urbains dans la zone de Marseille. 200
Figure 45 : Vulnérabilité des différents types de réseaux urbains dans les zones de la Basse Huveaune et du Vieux Port. 201
Figure 46 : La durée des coupures de réseaux successives aux inondations à Marseille (source : Enquête RDT). 207
Figure 47 : La durée des coupures consécutives au passage de l'ouragan dans le Comté de Harris en juillet 2008 (source : Stein, 2009). 207
Figure 48 : Place de la mémoire du risque inondation dans la stratégie de gestion des deux exploitants des réseaux urbains face aux inondations. 218
Figure 49 : Déroulement de la minute de déclenchement du système de risques. 223
Figure 50 : Interdépendances des réseaux et effets dominos dans la perturbation du système urbain barcelonais, juillet 2007. 225
Figure 51 : Données multi-sources intégrées dans la base de données @PAGON. 227
Figure 52 : Les vitesses automobiles, application des intervalles flous. (POBOT, Unice, 2003). 238
Figure 53 : Méthode de délimitation des zones d'approximations pour les objets « districts » appliquée à l'expression « tout ». 239
Figure 54 : Définition des intervalles flous pour déterminer l'état des cellules spatiales en termes d'approvisionnement électrique à partir des indices fusionnés de manière additive. 244
Figure 55 : Définition des intervalles flous pour déterminer l'état des cellules spatiales en termes d'approvisionnement électrique à partir des indices fusionnés de manière multiplicative. 245
Figure 56 : Implémentation du semis de points correspondant aux postes de transformation électrique de Barcelone dans l'interface WVD. 248
Figure 57 : Construction du diagramme de Voronoï standard associé aux postes de transformations du réseau électrique de Barcelone dans l'interface WVD. 249
Figure 58 : Construction des polygones de Voronoï pondérés de manière multiplicative associés aux postes de transformations du réseau électrique de Barcelone. 250
Figure 59 : Comparaison des structures spatiales obtenues avec les polygones de Voronoï standard (en vert) et les polygones de Voronoï pondérés (en bleu) et croisement aux limites communales de Barcelone. 251
Figure 60 : Synthèse des résultats de l'analyse de variance sur les polygones de Voronoï standard et pondérés. 253
Figure 61 : Evolution du nombre de foyers coupés entre le pic et la fin de la coupure électrique. 255
Figure 62 : Restauration progressive du fonctionnement des postes électriques au cours de la crise (0% indisponibilité totale - 100% état normal). 256
Figure 63 : Restauration progressive du fonctionnement des postes électriques au cours de la crise. 258
Figure 64 : Comparaison de l'évolution de la population coupée déclarée dans les rapports officiels avec les résultats de l'estimation à partir des polygones de Voronoï standard et pondérés. 263

LISTE DES CARTES

Carte 1 : Consommation d'électricité en KWh par habitant dans le Monde, avec valeurs de références comprises entre 2007 et 2011 selon les pays. (Source : Agence internationale de l'énergie, 2012)..... 19
Carte 2 : Densité démographique et niveau d'accessibilité en période d'inondation du Paillon dans la commune de Nice (Source : Voiron, Olivier, 2005). 49
Carte 3 : La topologie du réseau 400kV et son évolution entre 1960 et 2000 (Buzna, 2009, données RTE)..... 144
Cartes 4 : Evolution du rapport entre production et consommation électrique à l'échelle des régions françaises. (Données : RTE)..... 146
Carte 5 : Configuration du réseau et zone de fragilité PACA EST de criticité 4 (source RTE, 2006) 149
Carte 6 : L'hétérogénéité des rapports production – consommation à l'échelle de la région PACA. (Source : RTE, 2008)..... 150
Carte 7 : Localisation de l'incendie, de la ligne électrique haute tension Tavel Réaltor coupée et estimation imprécise de la zone impactée par la coupure. 153
Carte 8 : Variabilité des impacts électriques (en termes d'espace – durée - puissance délestée) en fonction de la localisation des incendies du Massif des Maures durant l'été 2003 (D'après RTE, 2007) 155
Carte 9 : Répartition des précipitations neigeuses de la nuit du 27 au 28 février à l'échelle du grand Sud Est (Source : Météo France, P. Carrega)..... 157
Carte 10 : Répartition des précipitations neigeuses de la nuit du 27 au 28 février autour du Massif de la Sainte Beaume (Source : Météo France, P. Carrega) 157
Carte 11 : L'endommagement des réseaux HT et THT par les intempéries de Février 2001, à l'échelle du Grand Sud est de la France. (Source, RTE 2001)..... 158
Carte 12 : Réseau de transport électrique du département varois, lignes électriques endommagées et périmètre impacté par la coupure au temps T1 le 28 février au matin (70 000 clients touchés)..... 161
Carte 13 : Evolution de la coupure électrique et émergence du risque de coupure d'eau potable au temps T2, le Jeudi 1er Mars 22 heures (H+40) (près de 29 000 clients touchés)..... 162
Carte 14 : Les dommages routiers et la durée de coupure électrique dans le département du Var le vendredi 2 mars en fin de soirée..... 166
Carte 15: Alimentation électrique de la commune de Marseille (les limites du bâti sont restreintes à la stricte commune marseillaise) 172
Carte 16 : Polygones de Voronoï à partir des postes sources contraints par limite communale de Marseille..... 173
Carte 17 : Partitions de Voronoï, 17a. à gauche et organisation des secteurs d'après la base de données d'ERDF sur le réseau électrique, 17b. à droite..... 173
Carte 18 : (a) Ajout des nœuds des postes de niveau inférieur (relations d'appartenance de 4279 postes électriques à 8 postes source en amont) ; (b) Relations verticales de niveau 1 différenciées en fonction de l'origine du poste source, et superposition avec le tissu du bâti urbain marseillais 175
Carte 19 : Raccordement des 712 postes clients aux 8 postes sources..... 176
Carte 20 : Voronoï 920 sur les postes clients les postes mixtes, contraints par la structure du Voronoï de niveau supérieur..... 177
Carte 21 : Diagrammes de Voronoï 3567 sur les postes de distribution publique et les postes mixtes, contraints par la structure du Voronoï de niveau supérieur..... 178
Carte 22 : Raccordement des nœuds du réseau électrique de distribution publique aux nœuds des bâtiments résidentiels. 179
Carte 23 : Raccordement des 3567 nœuds du réseau de distribution publique aux 57 000 nœuds de bâtiments résidentiels. 180

Carte 24 : Raccordement des 3567 nœuds du réseau de distribution publique aux 57 000 nœuds de bâtiments résidentiels, et raccordement des 8 postes sources aux 3567 nœuds du réseau de distribution publique. 181
Carte 25 : Raccordement des 3567 nœuds du réseau de distribution publique aux 57 000 nœuds de bâtiments résidentiels, et raccordement des 8 postes sources aux 3567 nœuds du réseau de d distribution publique. 182
Carte 26 : Idem que la figure précédente avec différenciation à plusieurs niveaux d'organisations des liens dont on distingue clairement l'imbrication en deux niveaux (les liaisons importantes alimentent des centres de niveau inférieur qui alimentent à leur tour des nœuds inférieurs dans la hiérarchie). . 183
Carte 27: Attribution des populations résidentes aux bâtiments résidentiels. (zone centre Marseille, Prado). 185
Carte 28 : Attribution des populations résidentes aux bâtiments résidentiels (zone périphérique). 185
Carte 29 : Les interdépendances entre le poste source Belle de Mai, 14 nœuds du réseau de distribution publique et 15 maisons de retraite. 188
Carte 30 : Les interdépendances entre les 8 postes sources, les 62 postes de distribution publique et les 67 maisons de retraite à l'échelle de la ville de Marseille. 189
Carte 31 : Les interdépendances entre les postes sources de Rabatau et de Sylvabelle, les postes clients 20 kV et les hôpitaux Saint Joseph, de la Timone, de la Conception et Paré. 190
Carte 32 : Les liaisons entre les postes électriques et les hôpitaux, trajectoires à enjeux de dépendance des systèmes de risques. 190
Carte 33 : Partitions de Voronoï imbriquées à partir des 816 postes restants. 192
Carte 34 : Postes clients raccordés et postes clients non raccordés après l'étape 2..... 193
Carte 35 : Partitions de Voronoï imbriquées à partir des 273 postes restants. 194
Carte 36 : Postes clients raccordés et postes clients non raccordés après l'étape 4..... 194
Carte 37 : Partition de Voronoï sur les 99 postes restants, postes clients raccordés et postes clients non raccordés après l'étape 5. 195
Carte 38 : Synthèse des liaisons établies à partir des postes clients et mixtes représentées en fonction de leur niveau de certitude..... 196
Carte 39 : Synthèse des interdépendances imbriquées entre le système « électrique » et le système « bâti » dans l'anthroposystème urbain. 197
Carte 40 : Périmètre inondable de l'Huveaune, du Jarret et des Aygalades (en bleu) et rues de la zone centrale du Vieux Port impactés lors de l'inondation de 1907 (en vert). 201
Carte 41 : Populations enquêtées, populations inondées et populations ayant subi des coupures électriques dans le secteur du Vieux Port. 204
Carte 42 : Populations enquêtées, populations inondées et populations ayant subi des coupures électriques dans le secteur de la Basse Huveaune. 205
Carte 43 : L'importante mémorisation des souvenirs d'impacts indirects de l'inondation dans la Cité de la Gardanne en bordure immédiate de l'Huveaune. 205
Carte 44 : Croisement du périmètre inondable du Plan Local d'Urbanisme avec les postes électriques et les postes électriques endommagés en 2000..... 210
Carte 45 : Regroupement à l'échelle des IRIS des zones touchées par des dommages matériels lors des inondations majeures dans la commune de Marseille depuis le début du 20ème siècle. 211
Carte 46 : Les espaces de la mémoire du risque inondation : historique de presse (1951- 2003), voies inondables et dommages électriques (2000)..... 212
Carte 47 : Les zones en bordure de l'Huvaune et du Vieux Port d'après les espaces de la mémoire du risque inondation : historique de presse (1951 - 2003), voies inondables, dires d'expert EDF et dommages électriques (2000)..... 213

Carte 48 : L'organisation de l'approvisionnement électrique de Barcelone par le réseau de transport 220kv en vert (géré par la société Red Eléctrica Española REE) et le réseau 110 kV en bleu (géré par Endesa). 222
Carte 49 : Vectorisation d'informations spatiales précises de la BD @Pagon dans l'environnement Google Earth. 228
Carte 50 : Vectorisation de la couche 3 sur la présence de coupure électrique à l'échelle des quartiers de l'agglomération de Barcelone. 229
Carte 51 : Construction du carroyage multi niveau en fonction des trois niveaux de précision spatiale. 230
Carte 52 : Estimation des sous-espaces affectés par la coupure électrique de Barcelone. Résultats obtenus avec la méthode de fusion 1 par superposition géométrique des maillages 1000, 500 et 100. 232
Carte 53 : Estimation des sous-espaces affectés par la coupure électrique de Barcelone. Méthode de fusion algébrique des 7 grilles initiales à l'échelle des cellules de 1000m. et valeurs de l'ICV. 234
Carte 54 : Estimation des sous-espaces affectés par la coupure électrique de Barcelone. Méthode de fusion algébrique des 7 grilles initiales à l'échelle des cellules de 500m. et valeurs de l'ICV. 235
Carte 55 : Estimation des sous-espaces affectés par la coupure électrique de Barcelone. Méthode de fusion algébrique des 7 grilles initiales à l'échelle des cellules de 100m. et valeurs de l'ICV. 236
Carte 56 : Traitement de l'information qualitative par une méthode de spatialisation floue. Carte Haut-Gauche : l'information brute extraite des expressions qualitatives précédentes, carte Haut-Droit : distinction entre le noyau de certitude et les marges plus incertaines (la valeur en vert correspond à la marge d'incertitude forte décrite en figure 53, carte Bas-Gauche : croisement des couches des 2 cartes précédentes et carte Bas-Droit : passage à des valeurs dans les grilles de 500. 240
Carte 57 : Estimation des sous-espaces affectés par la coupure électrique de Barcelone. Fusion additive des résultats des indices de couverture des mailles (cartes 54, 56) et des quantificateurs-localisateurs flous. 242
Carte 58 : Estimation des sous-espaces affectés par la coupure électrique de Barcelone. Fusion multiplicative des résultats des indices de couverture des mailles et des quantificateurs-localisateurs flous. 243
Carte 59 : Estimation des sous-espaces affectés par la coupure électrique de Barcelone selon la méthode de fusion additive. 244
Carte 60 : Estimation des sous-espaces affectés par la coupure électrique de Barcelone selon la méthode de fusion multiplicative. 245
Carte 61 : Attribution des cellules de 500 mètres aux bassins de dépendances des postes de transformation électrique (tessellations standard à gauche et pondérée à droite). 252
Carte 62 : Comparaison des espaces affectés par la coupure, d'après la simulation des polygones de Voronoï pondérés (à gauche) et la méthode de fusion de données empiriques (à droite). 254
Carte 63 : Classification des bassins de dépendance électrique en fonction de la durée de la crise, d'après les groupes observés dans la figure 62. 257
Carte 64 : Diffusion et résorption de la panne électrique dans les évènements du J-23 en fonction des 11 pas de temps définis dans la figure 18. 261
Carte 65 : Nombre d'habitants par quartier à Barcelone en 2007 (données Ajuntament de Barcelona). 262
Carte 66 : Les impacts immédiats de la coupure électrique sur les autres réseaux et sur la société.... 265
Carte 67 : L'implantation de nouveaux postes électriques (en rouge) dans la métropole de Barcelone, telle que prévue pour 2016 (Source : Generalitat de Catalunya, 2010). 268
Carte 68 : Délimitation des bassins de dépendance aux postes électriques en 2007 et 2016 et projection des espaces coupés si les dommages touchaient les mêmes postes en 2016 que lors de la panne de 2007. 268

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Recensement des infrastructures et secteurs critiques (Source : SPCC, 2006). 40
Tableau 2 : Ratio entre la fréquence où un réseau est impacté et celle où un réseau est impactant d'après les observations de dommages accidentels aux Etats Unis entre 1990 et 2004 (Source : Zimmerman, 2004). 53
Tableau 3 : Estimation de la vulnérabilité des infrastructures critiques (Source : Office Fédéral de la Protection de la Population, 2012). 126
Tableau 4 : Structure par âge des populations des deux secteurs d'étude marseillais..... 202
Tableau 5 : Vulnérabilité relative des équipements électriques au risque inondation en fonction des espaces de la mémoire du risque considéré. 214

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE 10

PARTIE 1 : CONCEPTS ET MÉTHODES POUR UNE ANALYSE GÉOGRAPHIQUE ET SPATIALE DES SYSTÈMES DE RISQUES LIÉS AUX RÉSEAUX 14

CHAPITRE 1 : AUTOUR DES RÉSEAUX 15

INTRODUCTION 15
1.1 PROPRIETÉS GÉNÉRALES DES ÉVÈNEMENTS À RISQUES IMPLIQUANT DES EFFETS DE RÉSEAUX 15
1.1.1. DEVELOPPEMENT, MODERNITE ET RISQUES 15
1.1.1.1. Des évènements qui mettent en lumière une forme originale de fragilité des territoires développés. 15
1.1.1.2. New York, capitale mondiale… des pannes électriques ? 17
1.1.1.3. Développement des territoires et évolution de la composante technique dans la relation Environnement - Société 18
1.1.2. COMPLEXITE ET IMPREVISIBILITE DES EVENEMENTS A RISQUES LIES AUX DYSFONCTIONNEMENTS DES RESEAUX 19
1.1.2.1. La disproportion entre les causes apparentes et leurs effets 19
1.1.2.2. L'importance des effets dominos. 20
1.1.2.3. La diversité des causes apparentes masque la récurrence de causes profondes 21
1.1.2.4. L'importance des causes contextuelles pour la spatialisation des systèmes de risque 23

1.2. VULNÉRABILITÉ DES RÉSEAUX, STRUCTURE ET STABILITÉ DES SYSTÈMES COMPLEXES 23
1.2.1 AUTO-ORGANISATION CRITIQUE ET DISTRIBUTION TEMPORELLE DES COUPURES ELECTRIQUES 23
1.2.1.1. Des événements à petite échelle et des risques à l'échelle des réseaux 23
1.2.1.2. La distribution temporelle des pannes électriques et l'auto-organisation critique du système électrique 24
1.2.2. LES LIENS ENTRE STRUCTURE ET STABILITE DES RESEAUX 29
1.2.2.1. L'organisation hétérogène et hiérarchique des réseaux scale-free et l'émergence de nœuds critiques 29
1.2.2.2. Des réseaux à la fois robustes et fragiles 33
1.2.3. LA DETECTION DES NŒUDS CRITIQUES ET LA VULNERABILITE DES COMPOSANTES DU RESEAU 35
1.2.3.1. Des hypersensibilités locales 35
1.2.3.2. La mesure des propriétés relationnelles des nœuds du réseau et la détection des composantes critiques 36
1.2.3.3. L'importance des liens faibles dans la généralisation des catastrophes 38

1.3. LES RÉSEAUX DANS L'ANALYSE ET LA GESTION DES RISQUES 38
1.3.1 LE CONCEPT D'INFRASTRUCTURES CRITIQUES 39

1.3.1.1. Un concept institutionnel à définition variable et aux orientations évolutives avec les menaces du moment ... 39
1.3.1.2. Informations stratégiques et enjeux de confidentialité ... 41
1.3.2. LA VULNERABILITE DES RESEAUX DANS UN CONTEXTE DE CATASTROPHE NATURELLE... 43
1.3.2.1. Cadre général ... 43
1.3.2.2. L'exemple de la vulnérabilité sismique des réseaux électriques dans les agglomérations américaines de Memphis et de Los Angeles ... 45
1.3.2.3. La vulnérabilité du réseau routier aux inondations et le risque de thrombose urbaine dans la ville de Nice ... 48
1.3.3. LES INTERDEPENDANCES DES RESEAUX COMME GENERATEURS D'EFFETS DE CASCADES 49
1.3.3.1. De la vulnérabilité du réseau à la vulnérabilité des réseaux, une approche plus compliquée ou plus complexe ? ... 49
1.3.3.2. L'interdépendance des réseaux, définition ... 50
1.3.3.3. La rareté des analyses empiriques sur ces effets dominos ... 51
1.3.3.4. Des interdépendances et des effets dominos multi-niveaux ... 54
CONCLUSION ... 56

CHAPITRE 2 : UNE APPROCHE SPATIALE DES SYSTÈMES DE RISQUES ET DE LEURS DIFFUSIONS ... 58

INTRODUCTION ... 58
2.1 OPTIQUES GÉNÉRALES DE LA RECHERCHE ... 58
2.1.1. ANCRER LES SYSTEMES DE RISQUES DANS LES INTERDEPENDANCES DES TERRITOIRES ET DES RESEAUX ... 58
2.1.1.1. Positionnement par rapport aux démarches existantes sur les risques et la vulnérabilité des réseaux techniques ... 58
2.1.1.2. Les interdépendances territoires - réseaux comme perspective d'ensemble sur les systèmes de risques ... 60
2.1.1.3. La panne électrique comme cas d'école pour l'analyse des systèmes de risques et de l'interdépendance des réseaux et des territoires ... 61

2.2. LES FONDEMENTS THÉORIQUES D'UNE APPROCHE SPATIALE DES SYSTÈMES DE RISQUES ... 62
2.2.1. ESPACE, RESEAU ET SYSTEME ... 62
2.2.1.1. Les interdépendances réseaux-territoires et la complexité spatiale ... 62
2.2.1.2. L'importance de l'imbrication et de la hiérarchie des réseaux dans le processus de structuration spatiale ... 68
2.2.1.3. L'importance de l'imbrication et de la hiérarchie dans le processus de diffusion spatiale 69
2.2.2. ESPACE, RISQUE ET SYSTEME ... 71
2.2.2.1. Le système de risques, composantes et propriétés ... 71
2.2.2.2. Un objet géographique encore mal défini : les territoires à risques ... 76
2.2.2.3. Les espaces à enjeux dans les systèmes de risque ... 79

2.3. DÉROULEMENT DE LA RECHERCHE ... 81
2.3.1. PROBLEMATIQUE ET HYPOTHESES ... 81
2.3.2. DEMARCHE ... 84
CONCLUSION ... 87

CHAPITRE 3 : SCRED, DEMARCHE DE DÉTECTION DES ESPACES À ENJEUX, SPATIALISATION APPROXIMATIVE ET POSSIBILISTE DES SYSTÈMES DE RISQUES 88

INTRODUCTION 88
3.1. SCRED, PRINCIPES GÉNÉRAUX 90

3.2. L'ESTIMATION DE LA SUSCEPTIBILITÉ COMME UNE POSSIBILITÉ D'ENDOMMAGEMENT INITIAL 91
3.2.1. DANS UN CONTEXTE D'INCERTITUDE FAIBLE, D'INFORMATION RETROSPECTIVE COMPLETE ET SPATIALEMENT PRECISE DES EVENEMENTS, UNE SUSCEPTIBILITE PROBABILISEE 91
3.2.2. L'INDETERMINATION DES TRAJECTOIRES ET L'EFFET DE SURPRISE DES SYSTEMES DE RISQUES 92
3.2.3. LE STATUT SCIENTIFIQUE DES CONNAISSANCES ET DES METHODES APPROXIMATIVES 94
3.2.4. DANS UN CONTEXTE D'INCERTITUDE FORTE ET D'IMPRECISION SPATIALE, UNE SUSCEPTIBILITE « POSSIBILISEE » ET DES SYSTEMES DE RISQUES FLOUS DANS DES ESPACES FLOUS 95
3.2.4.1. Distinctions entre l'imprécision spatiale et l'incertitude dans SCRED 95
3.2.4.2. Méthode d'estimation de la susceptibilité et traitement de l'imprécision spatiale 96
3.2.4.3. Méthode d'estimation de la susceptibilité et traitement de l'incertitude forte 100
3.2.4.4. Méthode d'estimation de la susceptibilité et traitement de l'imprécision verbale par le flou de type 2 106

3.3. ESTIMATION DE LA CRITICITÉ COMME UNE POSSIBILITÉ DE DIFFUSION DU SYSTÈME DE RISQUES 108
3.3.1. GRAVITE, CRITICITE ET REDYNAMISATION SPATIALE 108
3.3.2. LA LOGIQUE ITERATIVE D'UNE DIFFUSION SPATIALE PAR POINTS DE BASCULEMENT DU SYSTEME DE RISQUES 109
3.3.3. ESTIMATION DE LA CRITICITE ET DES BASSINS DE BASSINS DE DEPENDANCE 112
3.3.3.1. La structure hétérogène et hiérarchique du réseau électrique 112
3.3.3.2. La délimitation des bassins de dépendances spatiales fondée sur l'analyse des interdépendances verticales dans les réseaux électriques 114
3.3.3.3. La délimitation des bassins de dépendances spatiales fondées sur les tessellations de Voronoï pondérées de manière multiplicative (VPM) 116
3.3.3.4. L'intégration du flou artificiel pour modéliser les bassins de dépendances spatiales 117
3.3.4. ESTIMATION DE LA CRITICITE A L'ECHELLE DU RESEAU TECHNIQUE 122
3.3.4.1. Les interdépendances des réseaux techniques et ses évolutions. Vers l'arme réseau ? 122
3.3.4.2. Modélisation des interdépendances du réseau technique 125

3.4. LA RÉSILIENCE, DURÉE DE RESTAURATION DU SERVICE ET DE RESTABILISATION DU FONCTIONNEMENT TERRITORIAL 130

3.5. LA DÉPENDANCE SOCIÉTALE AUX RÉSEAUX TECHNIQUES ET L'IMPACT TERRITORIAL DES SYSTÈMES DE RISQUES DE COUPURES ÉLECTRIQUES 131
CONCLUSION 134

CONCLUSION PARTIE 1 136

PARTIE 2 : APPLICATIONS RÉTROSPECTIVES ET ANTICIPATIVES DES SYSTÈMES DE RISQUES DE COUPURES ÉLECTRIQUES 138

CHAPITRE 4 : ANALYSES RÉTROSPECTIVES ET APPLICATIONS À LA REGION PACA ET AU DÉPARTEMENT DU VAR 139

INTRODUCTION 139
4.1. ENTRE ÉQUILIBRE GLOBAL ET DÉSÉQUILIBRES LOCAUX : LA CONSTRUCTION DU RÉSEAU ET LE « NON-AMÉNAGEMENT » DES TERRITOIRES ÉLECTRIQUES 140
4.1.1. A L'ECHELLE DE L'EUROPE 140
4.1.1.1. L'exemple de la panne du 4 Novembre 2006 140
4.1.1.2. Quel modèle de territoire électrique européen ? 142
4.1.2 A L'ECHELLE DE LA FRANCE, L'EVOLUTION ET LA REORGANISATION DU TERRITOIRE ELECTRIQUE ENTRE 1960 ET 2005 143

4.2. SYSTÉMOGÉNÈSE ET ORGANISATION SPATIALE DU RISQUE ÉLECTRIQUE EN REGION PACA 147
4.2.1 UNE BIFURCATION DANS LE RAPPORT ENTRE LA PRODUCTION ET LA CONSOMMATION ELECTRIQUE DANS LES ANNEES 1980 147
4.2.2 UN TERRITOIRE AU PROFIL FORTEMENT HETEROGENE 149

4.3. LES INTERACTIONS ENTRE INCENDIES ET COUPURES ÉLECTRIQUES EN REGION PACA 151
4.3.1. LE CAS DE L'INCENDIE DU 6 MAI 2005 151
4.3.2. LES CAS D'INCENDIES DE JUILLET 2003 154

4.4. LA TEMPÈTE DE NEIGE DU 28 FEVRIER 2001 ET SON IMPACT SUR LES RÉSEAUX ET L'HABITABILITÉ DES TERRITOIRES VAROIS 156
4.4.1. LE DECLENCHEMENT ET LA DIFFUSION DU SYSTEME DE RISQUE 156
4.4.2. LA RESTAURATION ELECTRIQUE ET L'EMERGENCE DE NOUVELLES SITUATIONS A RISQUES 162
4.4.3. LA QUESTION DE L'ACCESSIBILITE ROUTIERE ET SES EFFETS SUR LA DUREE DE LA COUPURE ELECTRIQUE ET LA PERSISTANCE DU SYSTEME DE RISQUE 164
CONCLUSION 168

CHAPITRE 5 : SCRED, APPLICATION DANS UNE LOGIQUE POSSIBILISTE ET ANTICIPATIVE DANS LA MÉTROPOLE DE MARSEILLE 170

INTRODUCTION 170
5.1. LES INTERDÉPENDANCES RÉSEAUX – TERRITOIRES DANS LA COMMUNE DE MARSEILLE 171
5.1.1 LA CRITICITE ET LES INTERDEPENDANCES SPATIALES INDUITES PAR L'ORGANISATION DES RESEAUX TECHNIQUES ET DES TERRITOIRES 171
5.1.1.1. L'approvisionnement électrique de Marseille par le réseau de transport électrique, premier niveau d'imbrication spatiale 171

5.1.1.2. L'approvisionnement électrique des bâtiments résidentiels par le réseau de distribution électrique, second niveau d'imbrication spatiale 178
5.1.2 DEPENDANCE ELECTRIQUE ET DETECTION DES ESPACES A ENJEUX HUMAINS ASSOCIES AUX SYSTEMES DE RISQUES 184
5.1.2.1. Estimation de la population résidente par bâtiments 184
5.1.1.2. La dépendance électrique, les populations vulnérables et les trajectoires à enjeux des systèmes de risques 186
5.1.3 LES ENJEUX ECONOMIQUES ASSOCIES AUX SYSTEMES DE RISQUES DE COUPURES ELECTRIQUES ET LA PRISE EN COMPTE DE L'INCERTITUDE ET DE L'IMPRECISION DANS L'ESTIMATION DES INTERDEPENDANCES RESEAUX-TERRITOIRES……191
5.1.3.1 Raccordement des postes clients et mixtes aux bâtiments d'activités 191
5.1.3.2 Prise en compte de l'incertitude spatiale et raccordement par itération 192

5.2 LA MÉMOIRE DES INONDATIONS ET DES ENDOMMAGEMENTS DES RÉSEAUX TECHNIQUES 198
5.2.1. LES EFFETS DOMINOS MEMORISES PAR LES RIVERAINS, L'EXEMPLE DES PANNES ELECTRIQUES CONSECUTIVES AUX INONDATIONS 198
5.2.1.1. La vulnérabilité des différents types de réseaux urbains 198
5.2.1.2. Une dissociation forte entre les deux secteurs d'enquête… 200
5.2.1.3. …Qui tient principalement à des évènements de référence différents 201
5.2.1.4. Les effets dominos sur le Vieux Port, une mémoire d'évènements récents dont ne découle aucun ordre spatial apparent 203
5.2.1.5. Les effets dominos dans la Basse Huveaune, une mémoire plus ancienne, concentrée spatialement et socialement homogène 204
5.2.1.6. Mise en perspective avec les dommages et la durée des dysfonctionnements lors d'une catastrophe de grande ampleur 206
5.2.2. LES EFFETS DOMINOS DE L'INONDATION MEMORISES PAR LES GESTIONNAIRES ELECTRIQUES 208
5.2.2.1. De la relativité des périmètres inondables à une vulnérabilité variable des réseaux électriques 208
5.2.2.2. Quelle connaissance des périmètres inondables et quelle mémoire des inondations passées pour le gestionnaire du réseau électrique ? 215
5.2.2.3. La mémoire du risque est-elle absente dans la stratégie de gestion des inondations des réseaux électriques marseillais ? 216
5.2.2.4. Mise en perspective avec un autre gestionnaire de réseaux urbains, l'exemple de la SERAM : de la construction à l'opérationnalisation de la mémoire 217
CONCLUSION 218

CHAPITRE 6 : SPATIALITÉ ET TEMPORALITÉ DES RISQUES EN RÉSEAUX DANS LES SYSTÈMES URBAINS - ANALYSE RÉTROSPECTIVE DE LA COUPURE ÉLECTRIQUE DANS LA MÉTROPOLE DE BARCELONE, 23- 25 JUILLET 2007 220

INTRODUCTION 220
6.1. D'UN INCIDENT TECHNIQUE, PONCTUEL ET MINUTÉ A UN ÉVÈNEMENT URBAIN, COMPLEXE, DIFFUS DANS L'ESPACE - TEMPS 221
6.1.1 BARCELONE, 23 JUILLET 2007, 10H53, LA MINUTE DE DECLENCHEMENT DU SYSTEME DE DEFAILLANCES 221
6.1.2 INTERDEPENDANCE DES SYSTEMES DE RESEAUX ET DEFAILLANCES EN CASCADE 224
6.1.3 INSTABILITE DU SYSTEME URBAIN ET PROCESSUS DE DIFFERENCIATION SPATIALE..... 225

6.2. CARTOGRAPHIE DE LA COUPURE ÉLECTRIQUE BARCELONAISE DU 23 JUILLET 2007 ET MÉTHODE DE FUSION DE DONNÉES MULTI - SOURCES ET IMPRÉCISES..... 226
6.2.1. CONSTRUCTION DE LA BASE DE DONNEES @PAGON SUR LA PANNE ELECTRIQUE DE LA METROPOLE BARCELONAISE 226
6.2.2. TRANSFERT DES BASES DE DONNEES SIG DANS UN CARROYAGE MULTI NIVEAU ET METHODE DE FUSION DES INFORMATIONS 229
6.2.3. INTRODUCTION DES QUANTIFICATEURS ET DES LOCALISATEURS FLOUS..... 238
6.2.4 FUSION DES DONNEES 241

6.3. COMPARAISON À UNE STRUCTURE SPATIALE THÉORIQUE INDUITE PAR L'ORGANISATION DU RÉSEAU DE TRANSPORT ÉLECTRIQUE……247
6.3.1. LES TESSELLATIONS DE VORONOÏ PONDEREES DE MANIERE MULTIPLICATIVE (VPM) POUR MODELISER LES BASSINS DE DEPENDANCE AU RESEAU ELECTRIQUE..... 247
6.3.2. ANALYSE DE VARIANCE ET EFFETS D'APPARTENANCE SPATIALE DES DISTRIBUTIONS EMPIRIQUES..... 252

6.4. ANALYSE DES DYNAMIQUES SPATIO-TEMPORELLES DE LA COUPURE ÉLECTRIQUE 254
6.4.1. LA DUREE DE LA COUPURE J-23 254

6.5. LES EFFETS INDIRECTS DE LA COUPURE ÉLECTRIQUE..... 264
6.5.1. LES EFFETS IMMEDIATS ET L'INTERDEPENDANCE DES RESEAUX..... 264
6.5.2. LES EFFETS DIFFERES ET LA TRANSFORMATION DURABLE DU SYSTEME ELECTRIQUE BARCELONAIS..... 267
CONCLUSION..... 269

CONCLUSION GENERALE 270

ANNEXES..... 275

BIBLIOGRAPHIE 289

LISTE DES FIGURES..... 300

LISTE DES CARTES **303**

LISTE DES TABLEAUX **306**