

AUTOUR DES RÉSEAUX

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 événements 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 « événements », 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 PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES ÉVÈNEMENTS À RISQUES IMPLIQUANT DES EFFETS DE RÉSEAUX

1.1.1. Développement, modernité et risques

1.1.1.1. Des événements 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 événement 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 posséderait 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 (événements 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 forcément 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 événements. 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 événements, 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

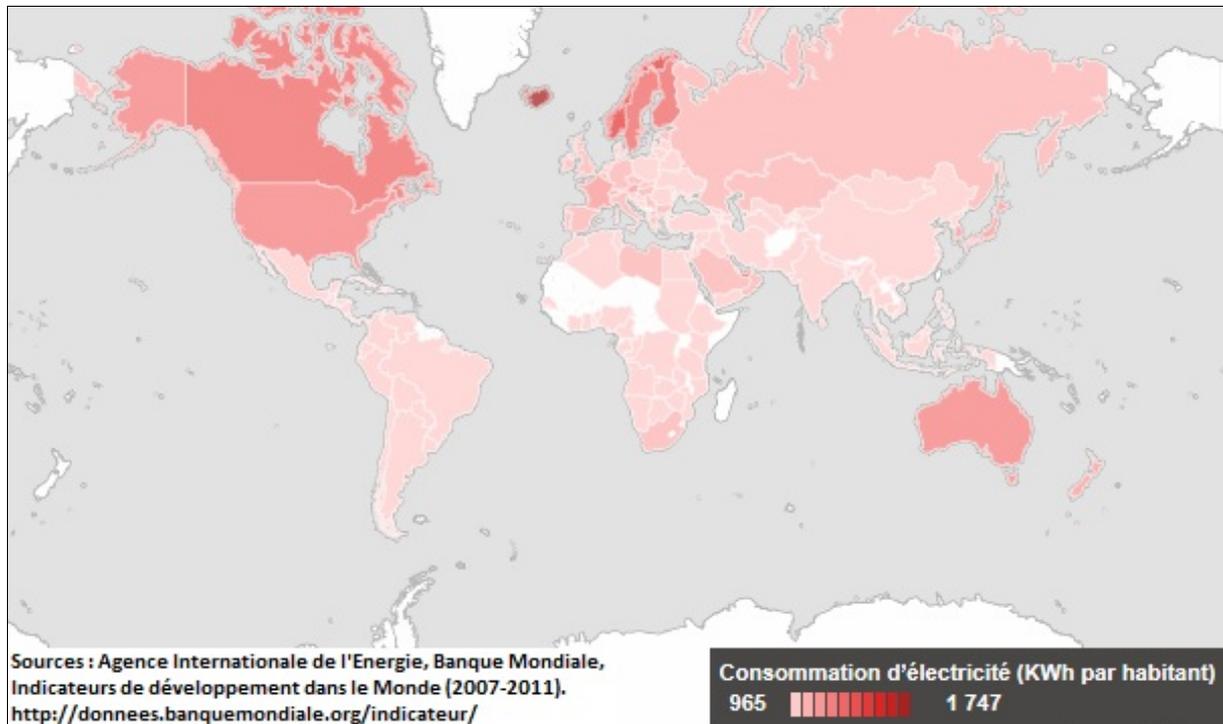
Dans la Société du Risque, Ulrich Beck parle de « nature sociétisée » pour qualifier l'imbrication totale du système « nature » dans la sphère du système sociétal ; cet élément est identifié comme une originalité forte des sociétés modernes : « tandis que la notion de société industrielle classique repose 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 événementielle 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 événementielles 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 événements 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 événements 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 événements 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 événements 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 événements 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 événements 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 événement localisé précisément dans le Temps et dans l'Espace. Cet événement 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 événement « 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 événements et des vulnérabilités qui les rendent possibles. Si en apparence quelques secondes peuvent suffire à leur déclenchement et leur diffusion, certains événements 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 événement 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 événements 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 événements 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 événements 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 événements 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 événement 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 événements à petite échelle a augmenté ou (et) que le coût de l'ensemble des impacts directs et indirects de ces événements 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 événements 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 événements 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).

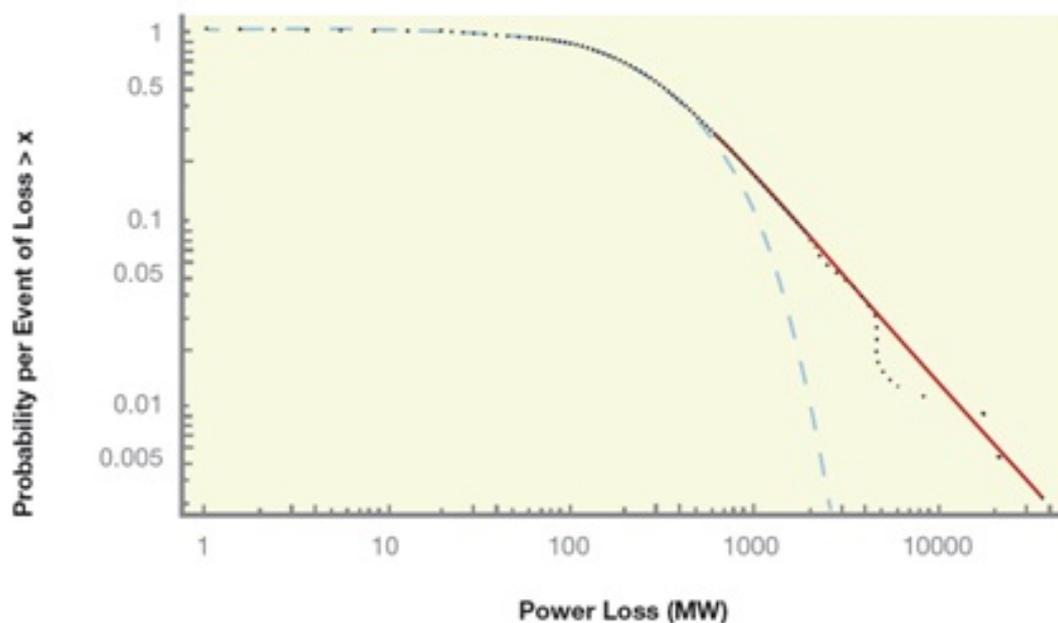


Figure 1 : Probabilités cumulées d'apparition des coupures électriques en Amérique du Nord en fonction de la quantité d'énergie non distribuée. La distribution exponentielle en trait hachuré est adaptée pour les petits événements mais sous-estime nettement la distribution des événements de grande taille. (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 événements, 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 événements 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.

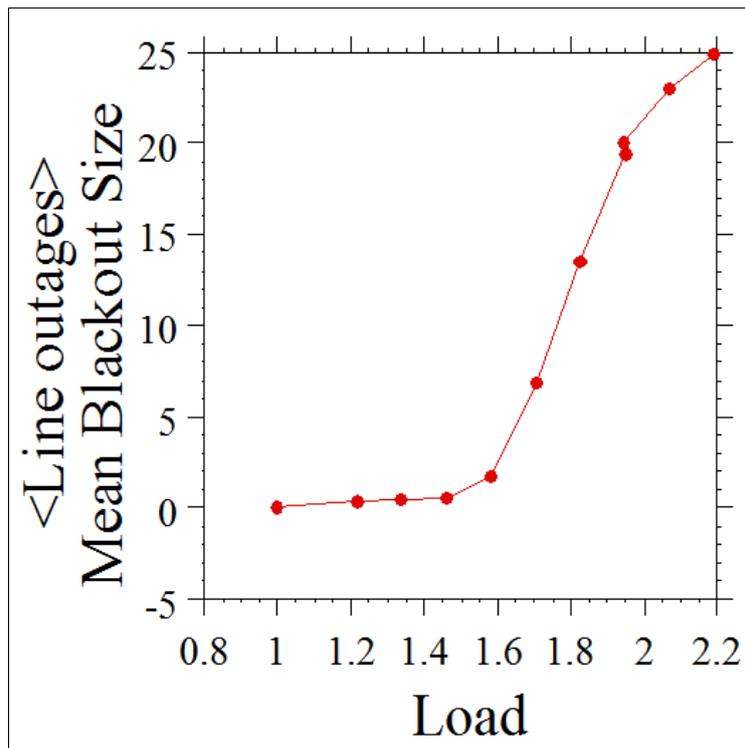


Figure 2 : Effet de seuil dans l'évolution de la taille des coupures électriques en fonction de la charge sur le réseau. (Source : Dobson, Carreras, 2001).

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.

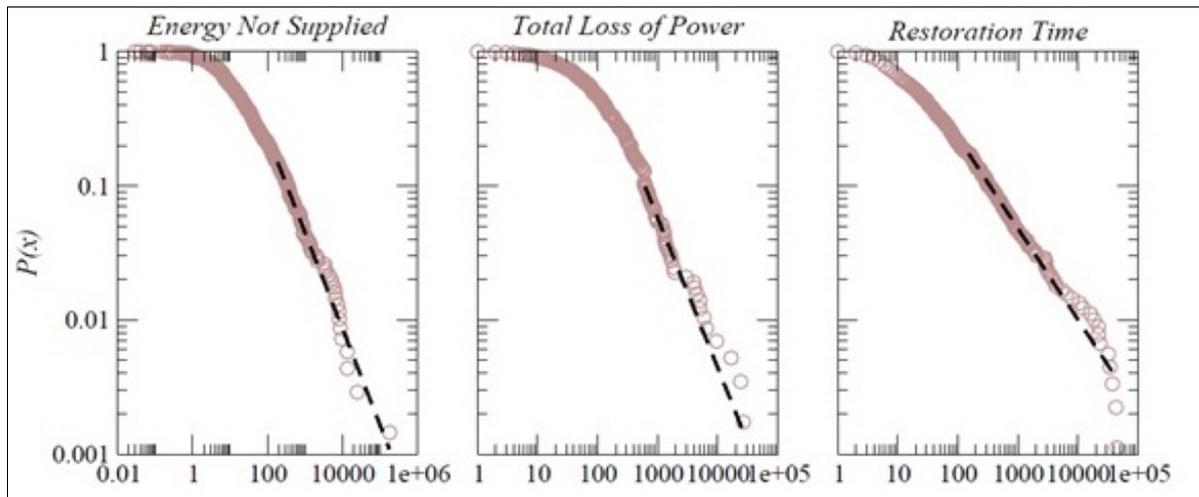


Figure 3 : Probabilités cumulées d'apparition des coupures électriques en Europe en fonction de la quantité d'énergie non distribuée, de la perte de charge et du temps de restauration. (Source : Rosas, Solé, 2010).

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 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).

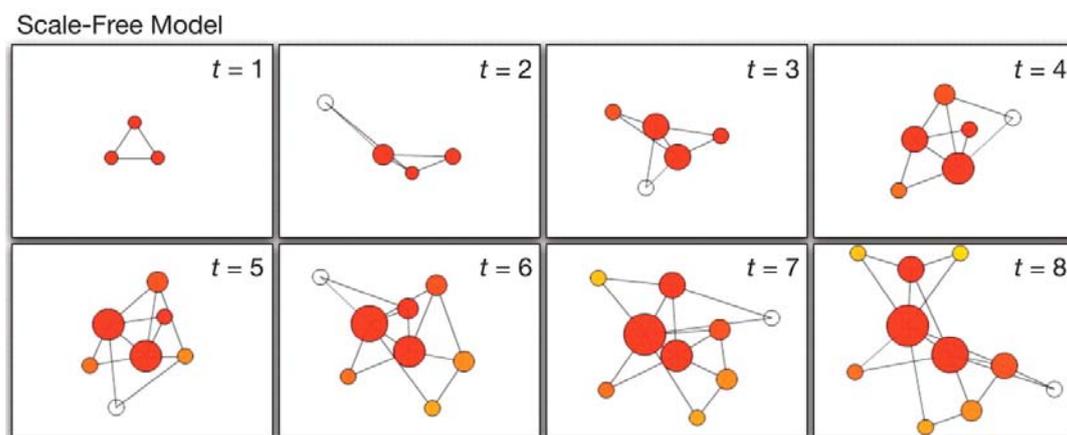


Figure 4 : Le principe d'attachement préférentiel et le développement continu de l'hétérogénéité vers une structure de réseau scale-free.

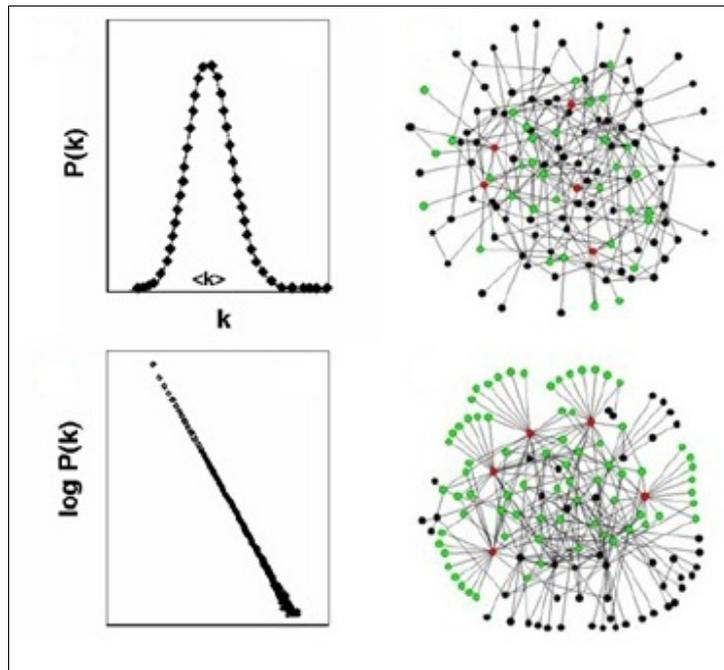


Figure 5 : Structure et connexité dans les réseaux aléatoires (haut) et réseaux scale free (bas). (Source : Barabasi et al., 2003).

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).

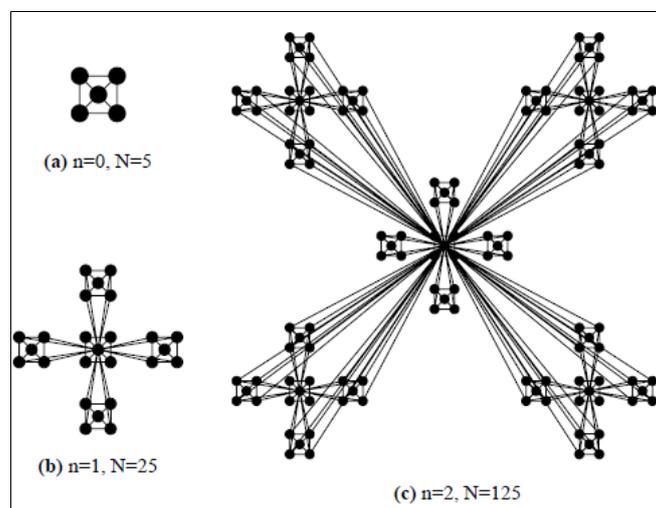


Figure 6 : Modularité et dimension hiérarchique dans les réseaux scale-free. (Source : Barabasi et al., 2003).

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 20^{ème} 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.

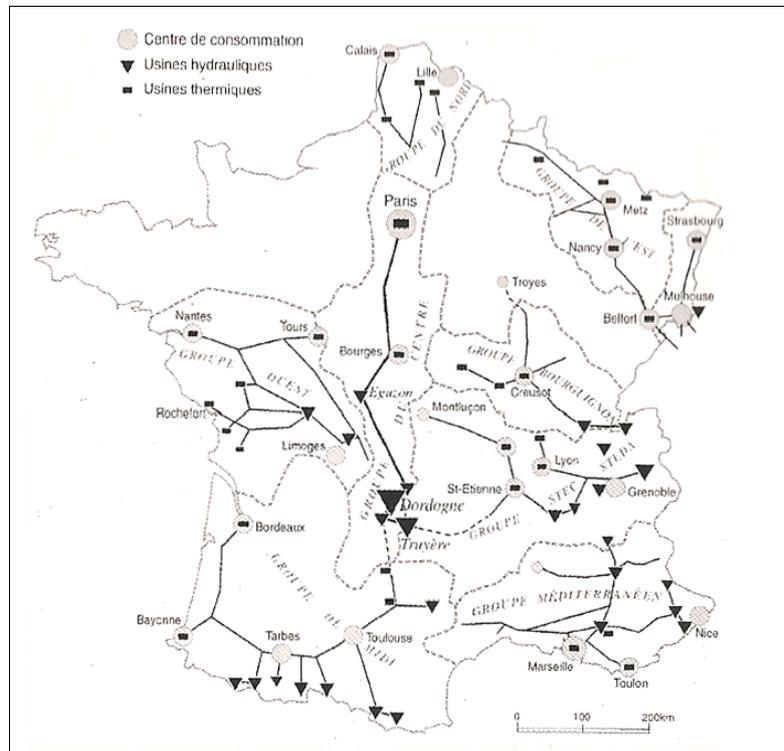


Figure 7 : Les groupes d'interconnexion au début des années 1930. (Source : Renaud, 1931, cité dans Bouneau et al., 2007).

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.

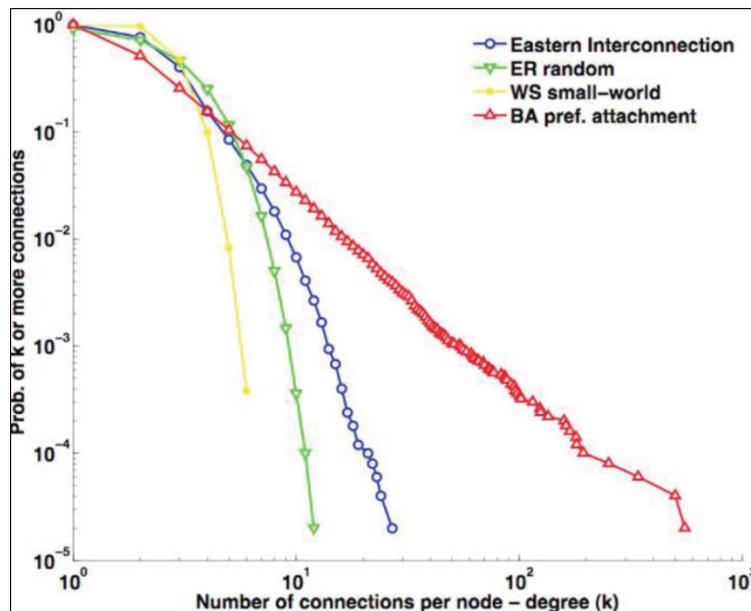


Figure 8 : Comparaison du réseau d'interconnexion électrique de l'Est Américain avec des structures théoriques de références. (Hines, 2010).

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*

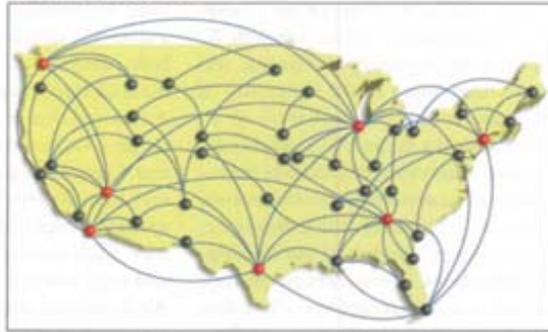
Nous avons débuté ce chapitre à partir d'une citation de Jacques Theys qui mettait en valeur la dimension chaotique et la disproportion entre les causes et les effets dans les systèmes de risques. La citation que nous emprunterons à nouveau à cet auteur met cette fois en valeur la nature antinomique 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.

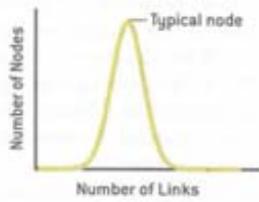
Random Network



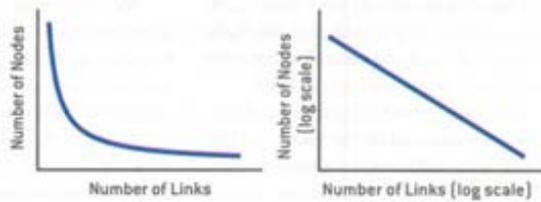
Scale-Free Network



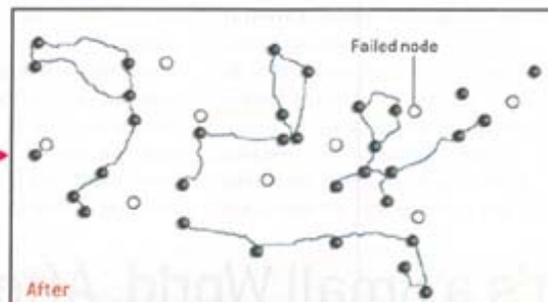
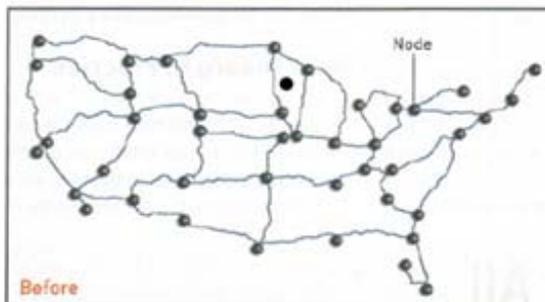
Bell Curve Distribution of Node Linkages



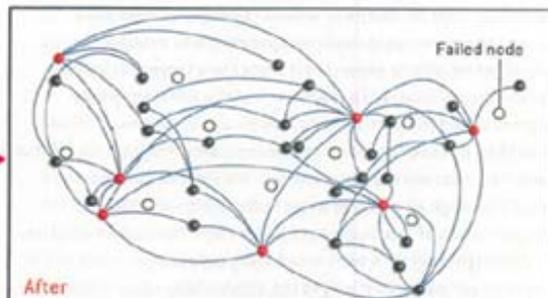
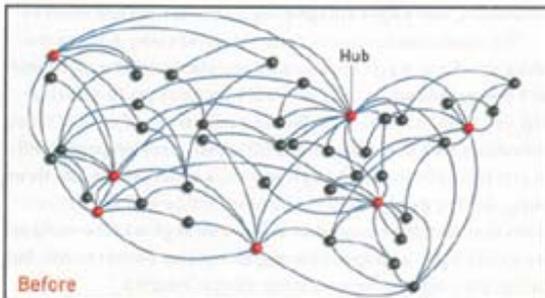
Power Law Distribution of Node Linkages



Random Network, Accidental Node Failure



Scale-Free Network, Accidental Node Failure



Scale-Free Network, Attack on Hubs

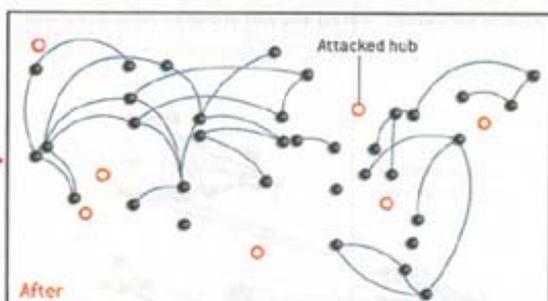
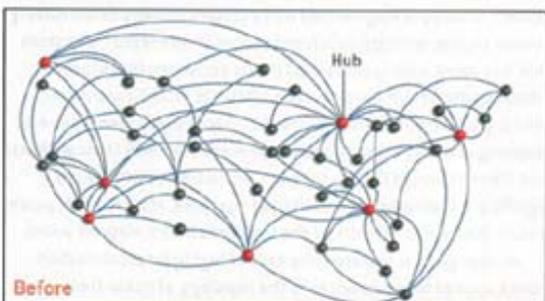


Figure 9 : La vulnérabilité des structures scale-free aux attaques ciblées (Source : Barabasi, Bonabeau, 2002).

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 forcément 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 événements 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'événements 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 posséderait 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.

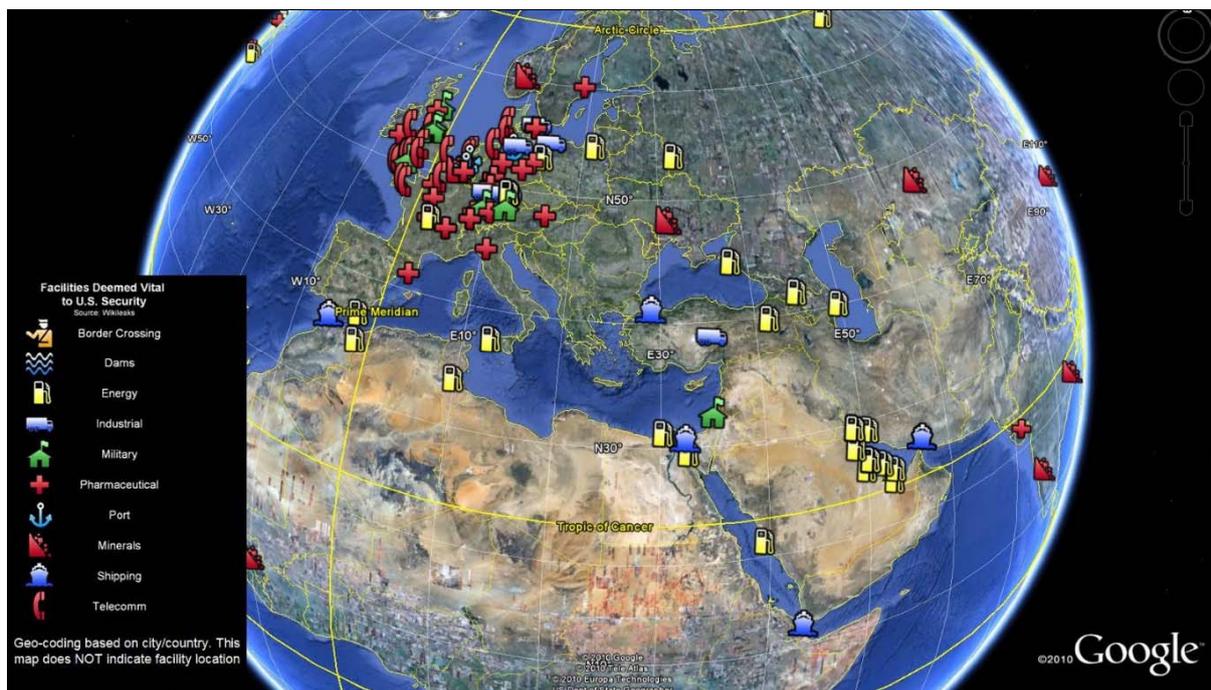


Figure 10 : Géoréférencement des infrastructures et des secteurs critiques de la liste diffusée par Wikileaks (Source : Anonyme).

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 relie 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).

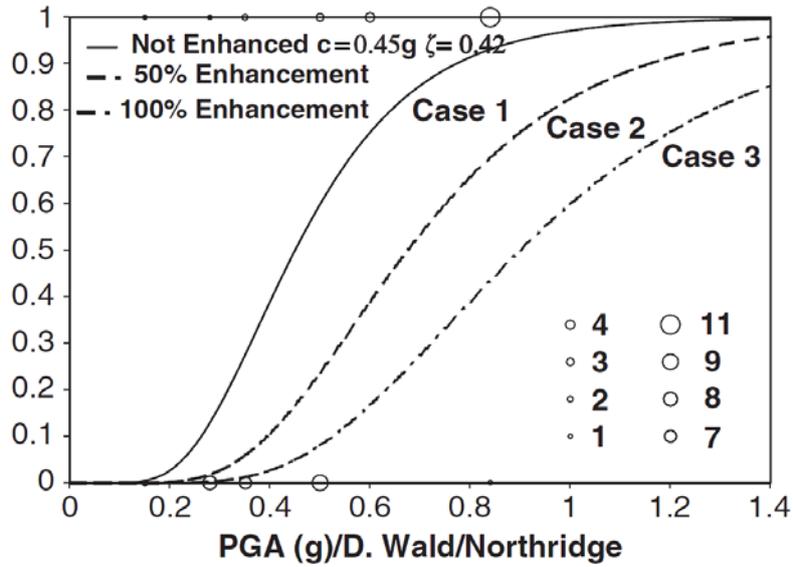
Ces deux recherches qui semblent sans rapport, tant elles portent sur des territoires, des aléas naturels, des réseaux, des finalités et des méthodes différentes, relèvent pourtant, toutes deux, d'une approche complexe du risque où la composante réseau est à la fois impactée et impactant.

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

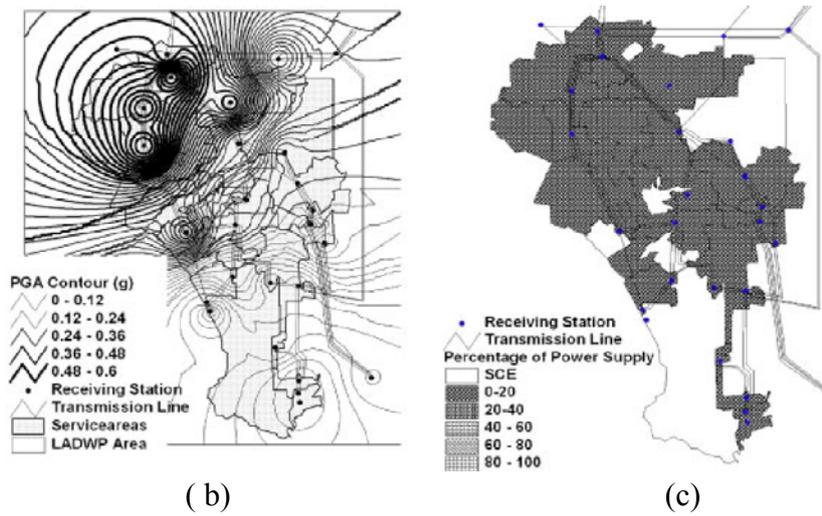
Les courbes de fragilité, une approche probabiliste de l'impact direct

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'accélération 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 $a = \text{PGA}$, $c = \text{médiane des valeurs de PGA}$ and $\zeta = \text{log standard déviation des PGA}$

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

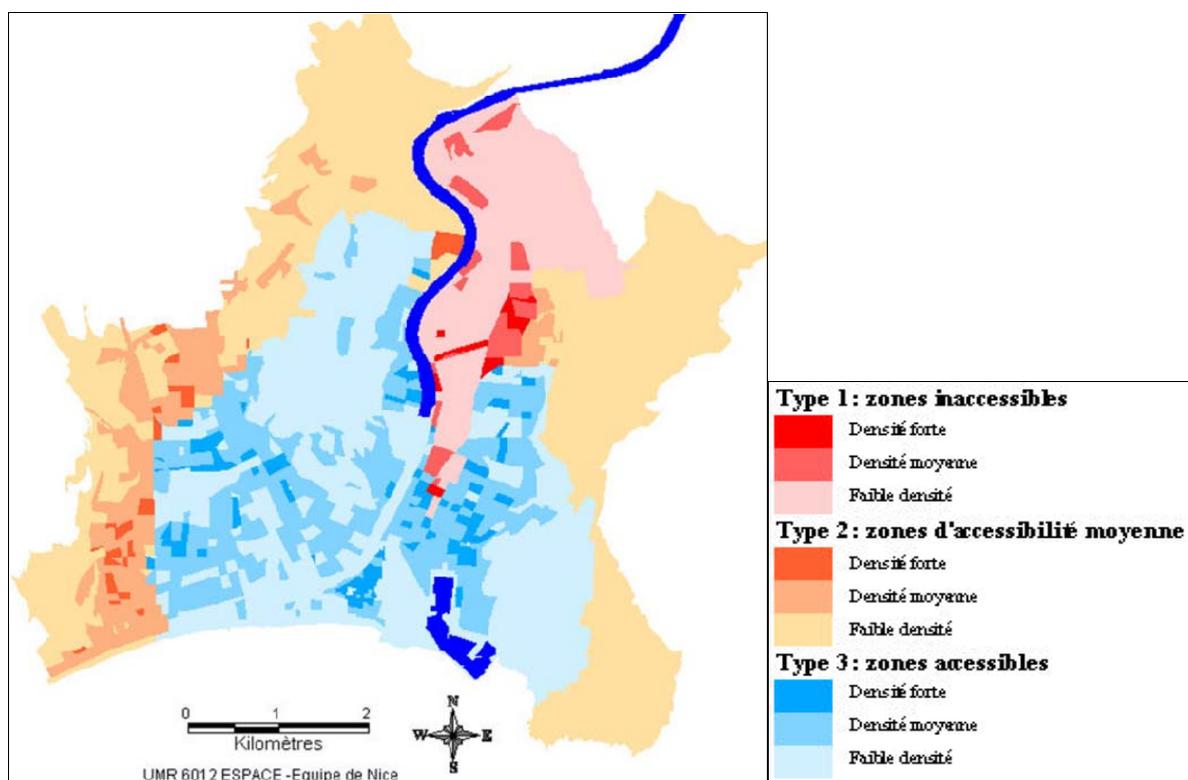
Malgré des différences thématiques, géographiques et méthodologiques, les deux approches présentées dans le cadre de l'état des recherches sur les risques naturels et la vulnérabilité des réseaux ont en commun le souci de travailler à la fois sur l'impact direct au réseau, la diffusion du dommage initial 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 événement 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.

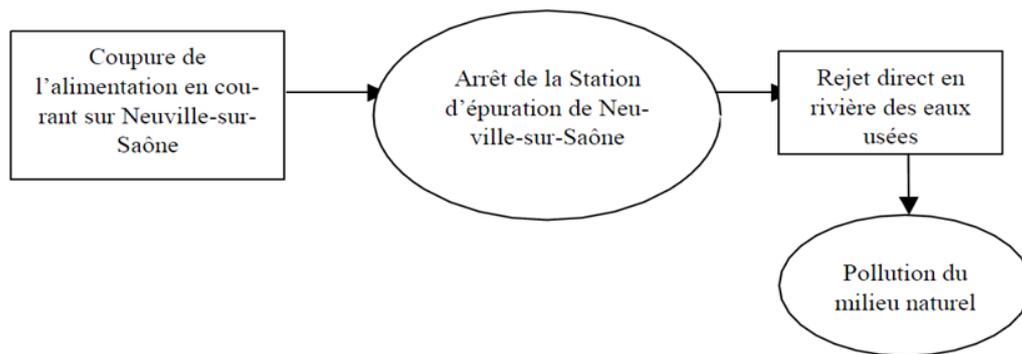


Figure 12 : Effets en chaîne consécutifs à l'arrêt de la station d'épuration de Neuville-sur-Saône (Source : CERTU, 2001).

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 événements 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) <u>Caused</u> Failure of Other Infrastructure	3 # of Times Infrastructure (Column 1) was <u>Affected</u> 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.

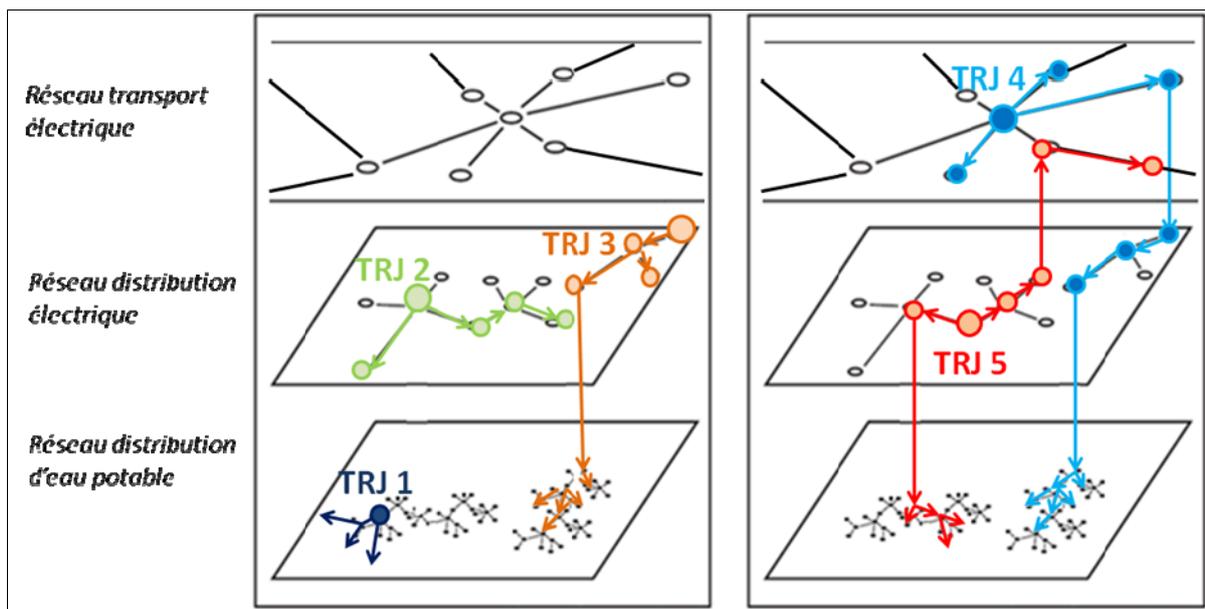


Figure 13 : Imbrications des réseaux, interdépendances verticales et trajectoires des systèmes de risques (inspiré de la représentation de Hagerstrand, 1953, dans Daudé, 2002).

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'utilisateur 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'électricité quasi généralisé.

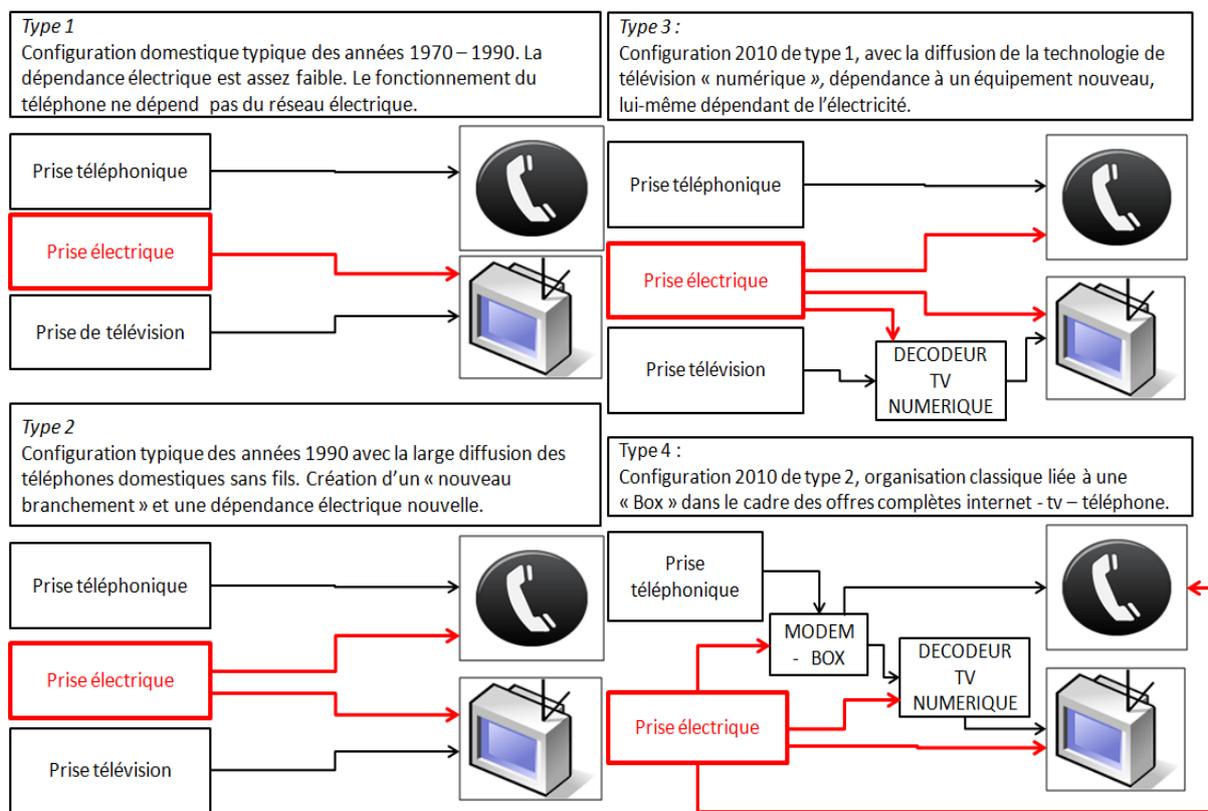


Figure 14 : Complexification des interdépendances du réseau domestique et aggravation, entre 1970 et 2010, de la dépendance électrique des services téléphoniques et télévisuels.

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 événements 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'explicitier plus clairement notre problématique et notre démarche de recherche ainsi que les principales hypothèses qui la sous-tendent.