

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

Introduction

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

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

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

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

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

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

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

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

3.1. SCReD, PRINCIPES GÉNÉRAUX

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

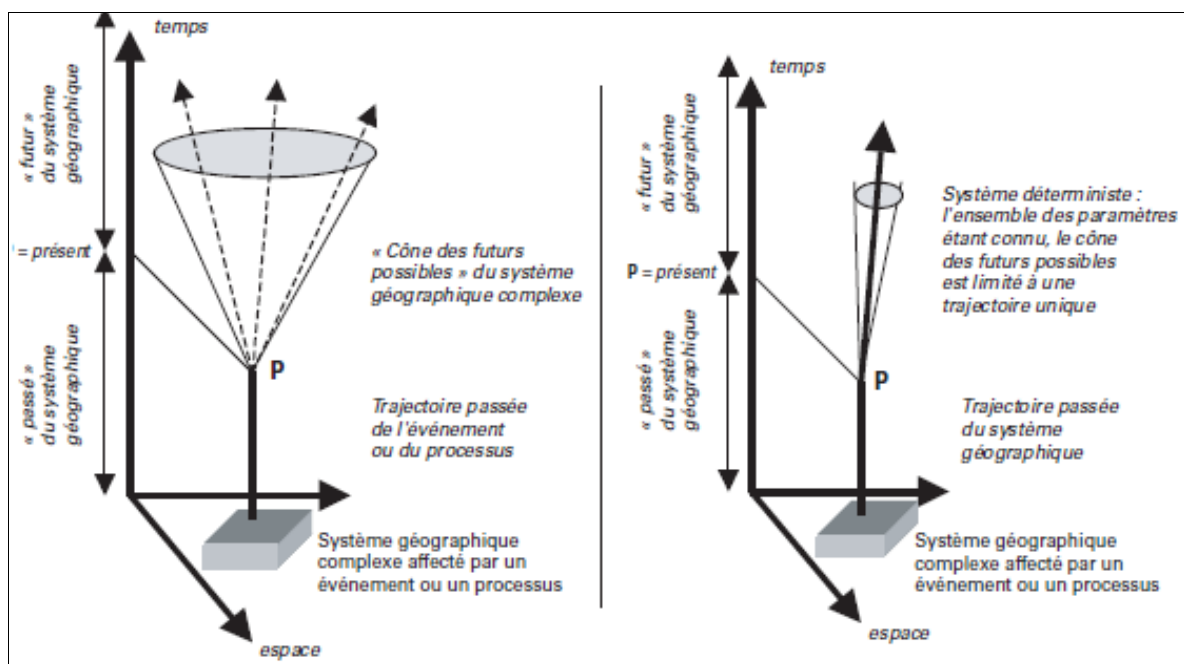


Figure 18 : Concept de cône des futurs possibles d'un système géographique complexe et de trajectoire limitée d'un système géographique complexe (Rolland May, 2001).

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

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

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

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

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

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

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

3.2.3. Le statut scientifique des connaissances et des méthodes approximatives

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

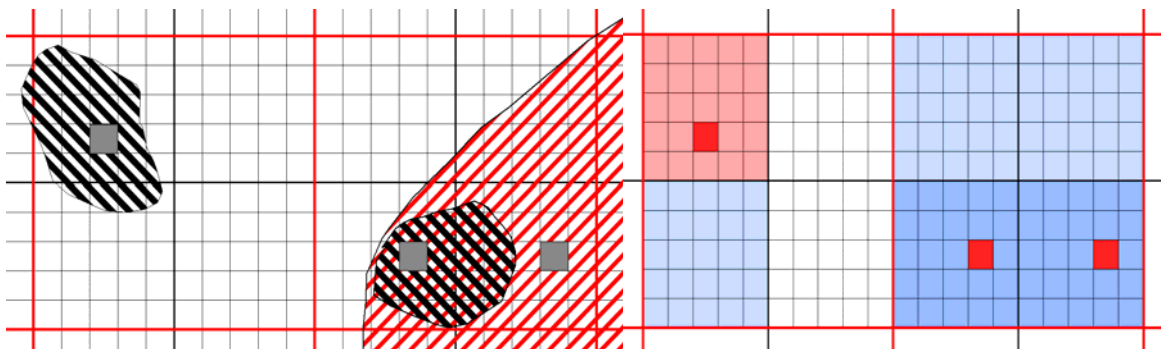
3.2.4.2. *Méthode d'estimation de la susceptibilité et traitement de l'imprécision spatiale.*

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

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

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

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



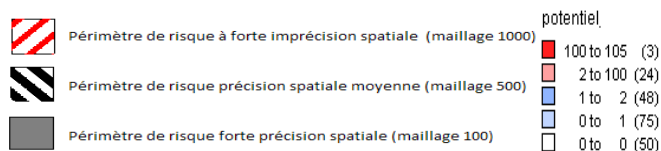


Figure 19 : Imbrication et variabilité de l'imprécision spatiale dans la connaissance de l'aléa (19a) et estimation du niveau de risque d'impact (19b).

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

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

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

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

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

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

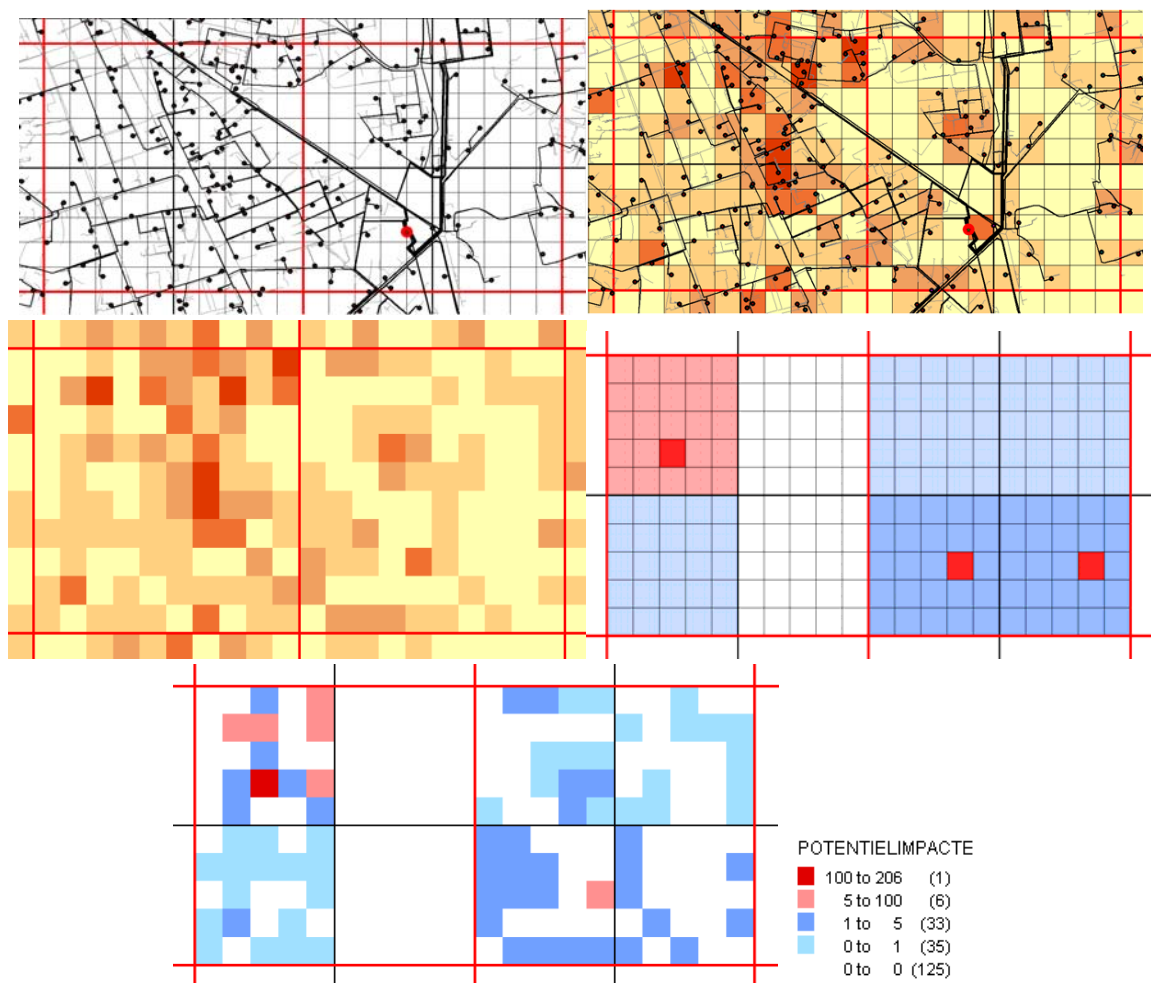


Figure 20 : Croisement des données sur la densité de nœuds du réseau avec les données sur la perturbation obtenue en figure 19.

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

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

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

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

D'autres méthodes peuvent également permettre d'envisager de manière plus ouverte l'endommagement possible des postes électriques. Par exemple, nous avons présenté dans le chapitre 2, la méthode de construction des courbes de dommages probabilistes à partir de données observées sur les endommagements des postes électriques, lors du séisme de North Ridge (Shinozuka, 1998). Le cadre des possibilités peut permettre d'envisager autrement la mesure de l'incertitude quant à ces endommagements.

Dans le cadre de la théorie des probabilités traditionnelles (P_x), la somme des probabilités d'un évènement est nécessairement égale à 1 et toutes les alternatives doivent être connues et chiffrées. La probabilité d'apparition d'un évènement n'est pas une valeur intrinsèque de son

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

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

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

Zadeh souligne plusieurs points :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

U (Perturbation) en PGA (g/d)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0,60		
Probabilités P d'endommagement	0	0.03	0.25	0.4	0.6	0.75		
Possibilités π_1 d'endommagement FLOU de type 1	0.1	0.3	0.5	0.8	1	1		
Possibilités π_2 d'endommagement FLOU de type 2	[0 - 0,2]	[0 - 0,4]	[0,2 - 0,6]	[0,4 - 0,9]	[0,55 - 0,1]	[0,6 - 1]		
U (Perturbation) en PGA (g/d) (Suite)	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40
Probabilités P d'endommagement	0.82	0.9	0.95	0.98	1	1	1	1
Possibilités π_1 d'endommagement FLOU T1	1	1	1	1	1	1	1	1
Possibilités π_2 d'endommagement FLOU T2	[0,7 - 1]	[0,73 - 1]	[0,75 - 1]	[0,77 à 1]	[0,79 - 1]	[0,8 - 1]	[0,83 - 1]	[0,88 - 1]

équipement électrique face à une perturbation sismique.

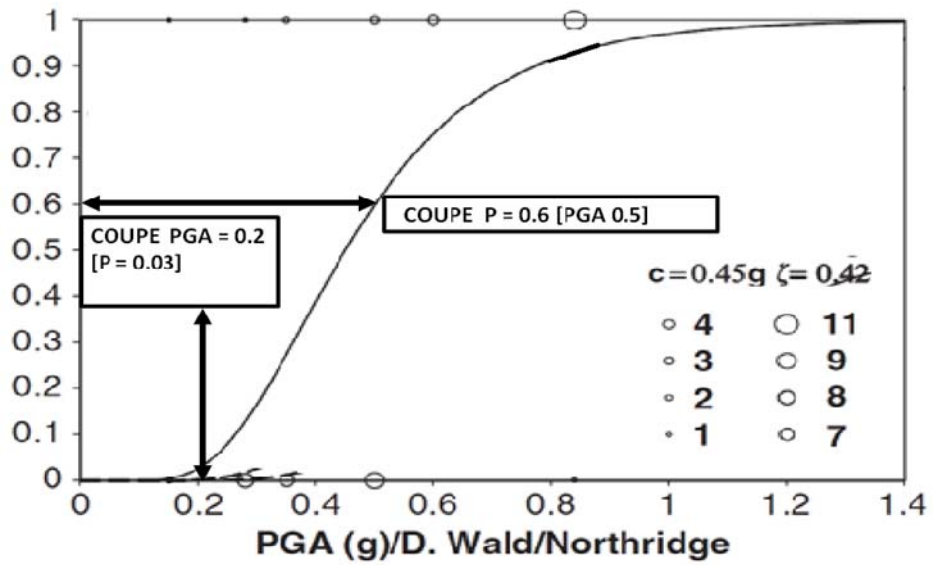


Figure 23 : Courbe de probabilités de dommages obtenues à partir des observations du séisme de Northridge.

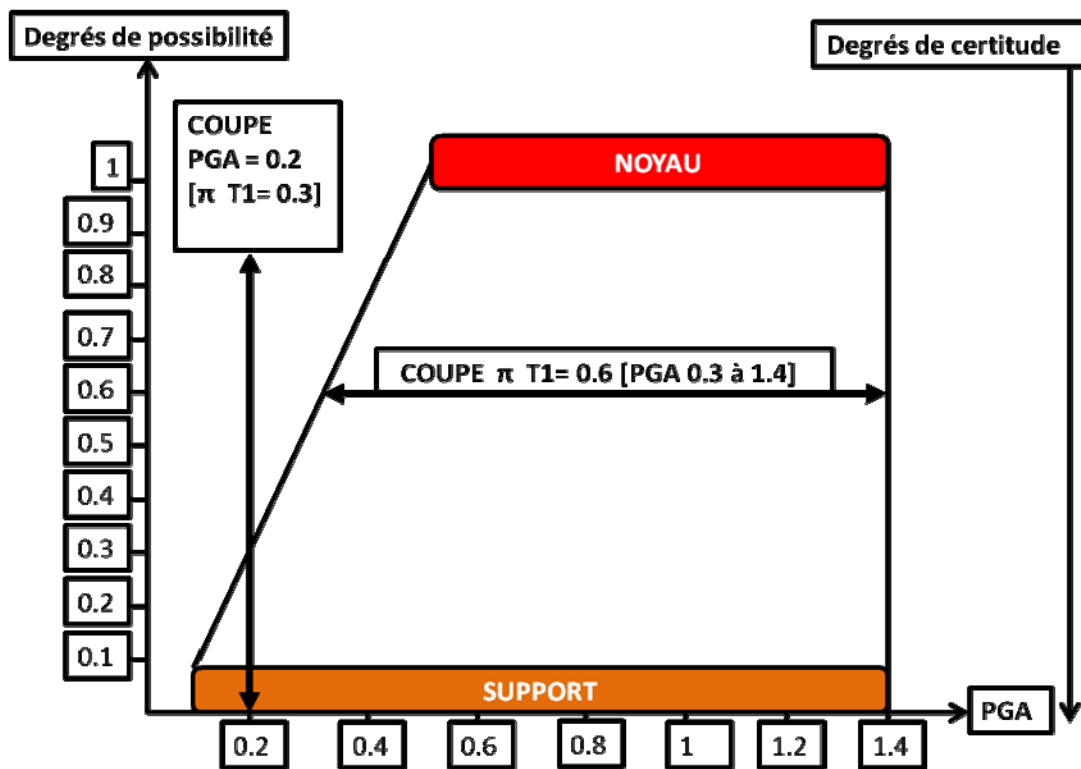


Figure 24 : Estimation de l'incertitude de l'endommagement dans une logique possibiliste.

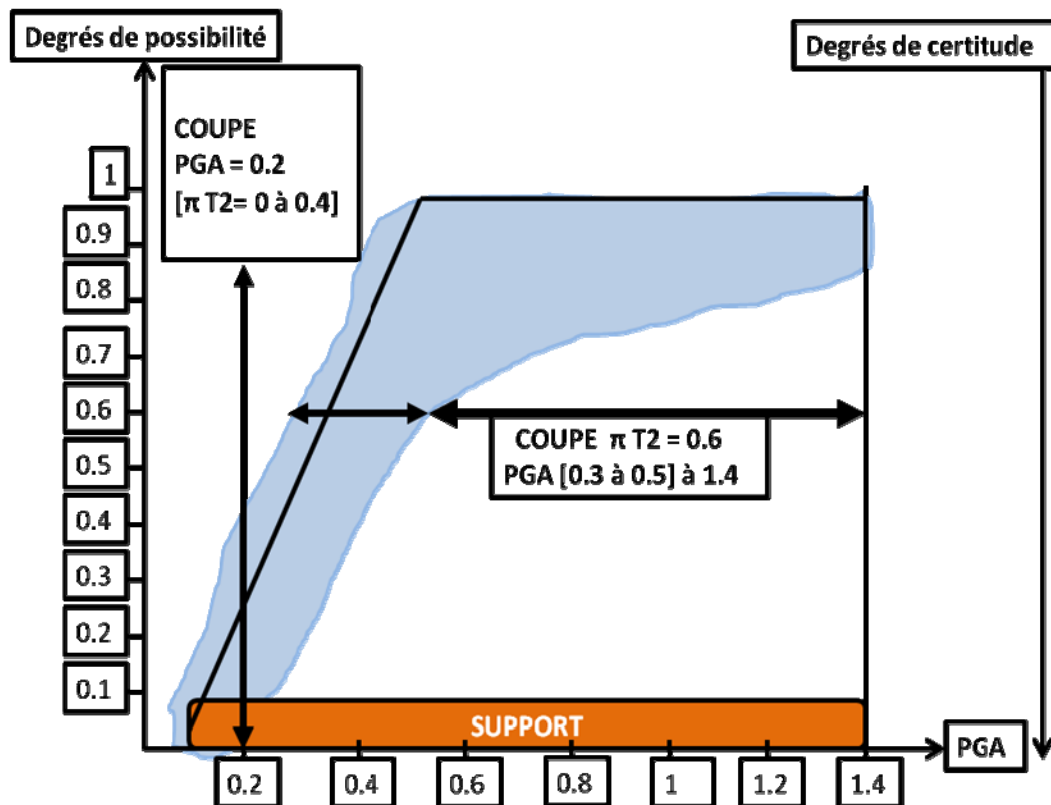


Figure 25 : Estimation de l'incertitude de l'endommagement dans une logique possibiliste avec introduction d'un niveau d'imprécision supplémentaire (flou de type 2).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

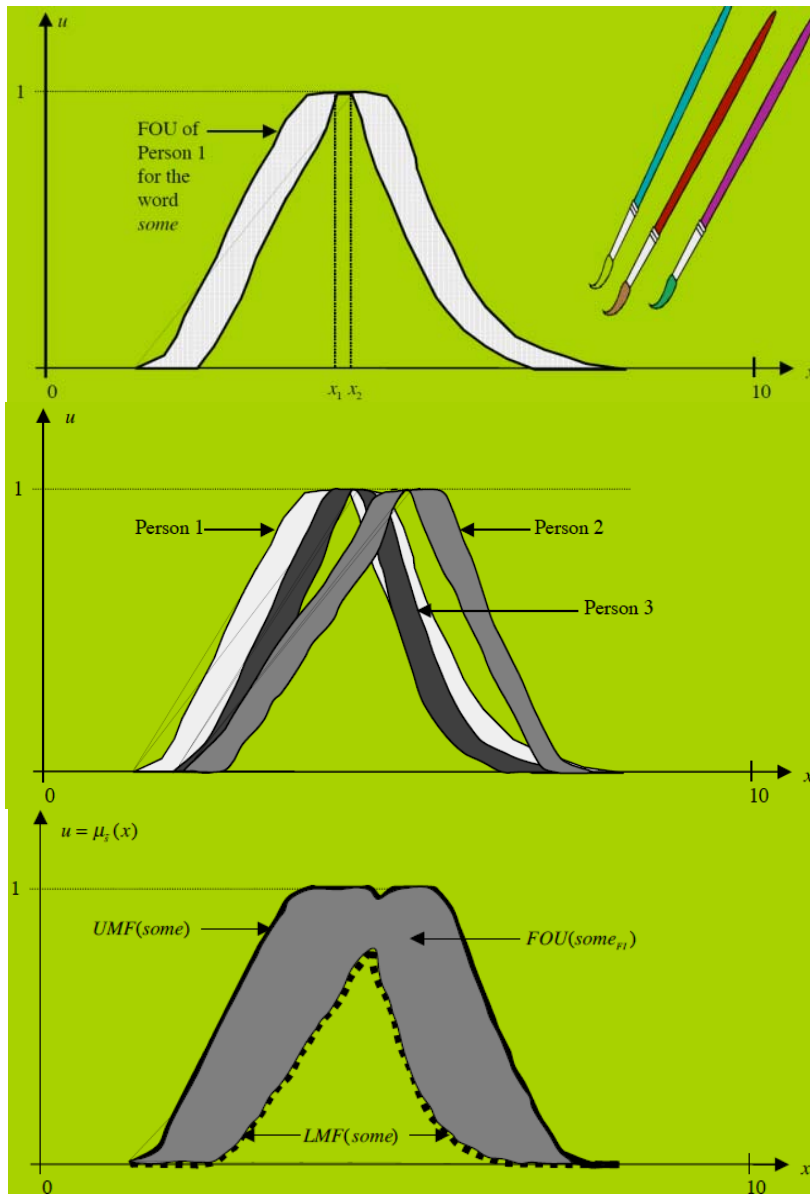


Figure 26 : Intra et inter incertitudes syntaxiques et la modélisation d'ensemble flou de type 2, l'exemple du mot «some ». (Mendel, 2004).

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

3.3.1. Gravité, criticité et redynamisation spatiale

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Le modèle RS associe les ensembles fermés aléatoires (Matheron, 1975) à des chaînes de Markov et s'appuie sur le tirage de points aléatoires d'éclosion d'incendies, qui vont se propager dans l'espace à des rythmes et dans des directions différentes en fonction des conditions de l'espace sur lesquels ils se propagent. A l'intérieur de ces surfaces endommagées, de nouveaux points d'éclosion sont tirés aléatoirement et vont engendrer une nouvelle propagation zonale à l'intérieur de laquelle on peut déterminer de nouveaux points d'éclosion possible. Dans la figure suivante, le processus de diffusion est initié dans le point X_0 , il se diffuse à l'ensemble $\delta(X_0)$, puis est rediffusé dans deux directions opposées à partir de Y_1 et Y_2 ... La diffusion se fait donc de zone en zone, mais aussi partiellement zone sur zone puisqu'il y a systématiquement une superposition partielle des ensembles fermés.

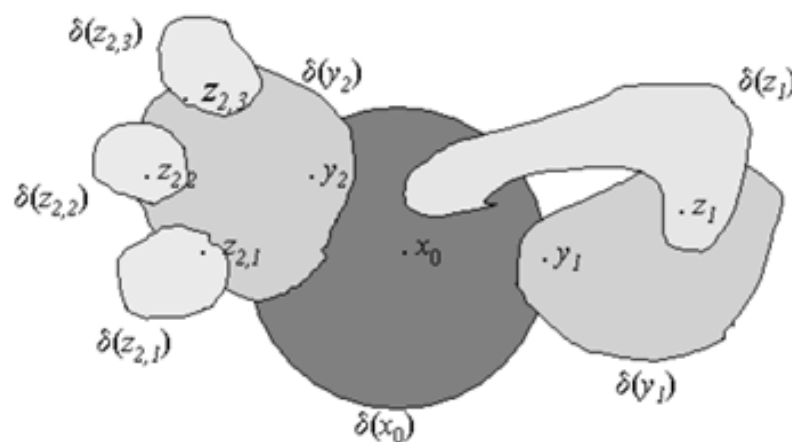


Figure 27 : La logique de diffusion dans le modèle Random Spread (Source : Serra, 2007).

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

- X0 : Une perturbation initiale qui se diffuse à partir de X0 dans l'ensemble $\delta X0$ (explosion, rupture de canalisation d'eau, incendie, séisme...).
- Y1 et Y2 : L'endommagement de deux postes sources du réseau électrique provoquant une coupure dans les zones $\delta (Y1)$ et $\delta (Y2)$.
- Z 1 à Z2 : Pompes du réseau d'eau potable impactées par la coupure électrique dans les zones $\delta (Y1)$ et $\delta (Y2)$ et qui, pour une raison ou une autre, ont cessé de fonctionner, suite à la panne électrique.

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

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

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

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

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

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

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

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

3.3.3.1. La structure hétérogène et hiérarchique du réseau électrique

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

La première logique de délimitation des aires de dépendances associées aux postes électriques s'appuie prioritairement sur la dimension hiérarchique entre les deux niveaux de postes de transformation (HTB/HTA) d'un côté et (HTA/BT) de l'autre. Pour déterminer les bassins de dépendance, la structure hiérarchisée des réseaux est utilisée. Ainsi, en tenant compte de la loi selon laquelle l'électricité emprunte le plus court chemin¹ sur le réseau pour aller d'un point A à un point B, l'hypothèse est faite qu'un poste de transformation (HTA/BT) est dépendant du poste de niveau supérieur HTB/HTA (dit poste source) qui lui est le plus accessible parmi l'ensemble des postes de niveaux supérieurs. Cette hypothèse est volontairement simplificatrice car l'organisation des flux électriques obéit également à d'autres lois nettement plus complexes ; néanmoins elle permet de travailler uniquement sur la structure topologique du réseau et non pas sur ses flux.

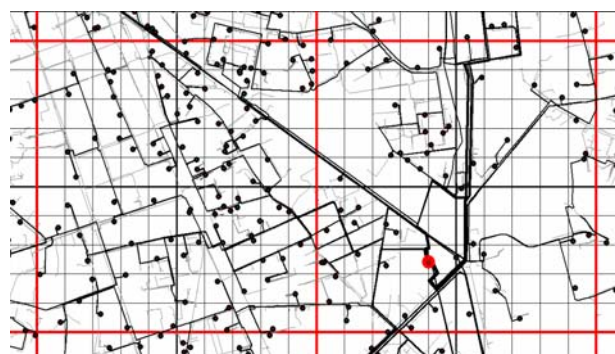
L'analyse des plus courts chemins sur les réseaux multi-niveaux permet de délimiter des sous-systèmes spatiaux (figure 28a.) qui correspondent à des espaces dont l'alimentation dépend d'un même poste de transformation. Dans l'exemple, la distance de Delaunay entre chaque

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

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

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

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



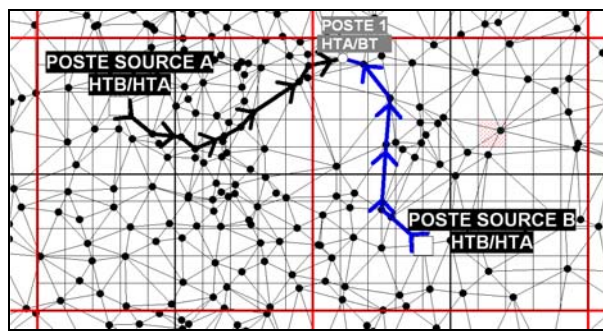


Figure 28 (a) : Détection des Chemins de Delaunay entre poste de transformation HTA/BT et deux postes de transformation HTB/HTA ...

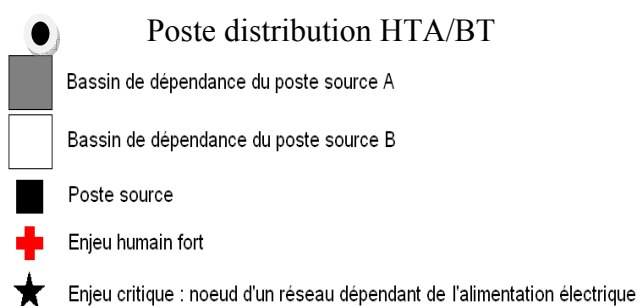
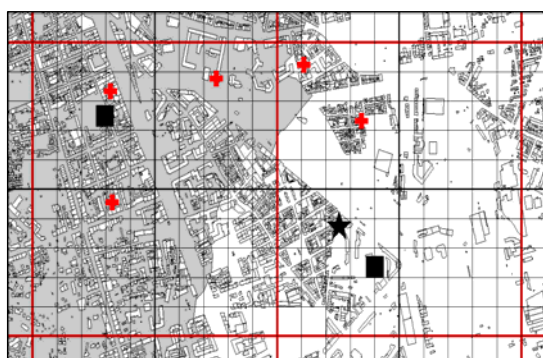
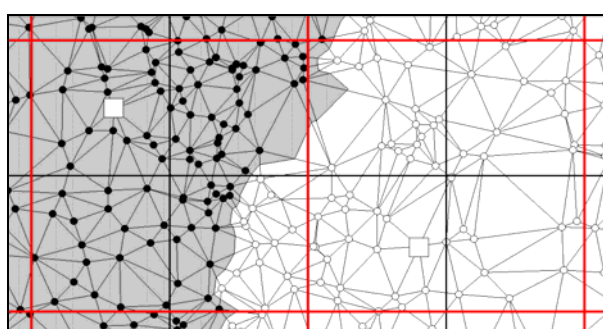


Figure 28 (b) : ... pour déterminer les interdépendances des postes de niveaux différents et les bassins de dépendance associés aux postes.

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

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

notre cas, les valeurs de pondération correspondent aux niveaux de voltage du courant à l'entrée du poste de transformation électrique.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Fuzzyfication et intégration de l'imprécision spatiale artificielle

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

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

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

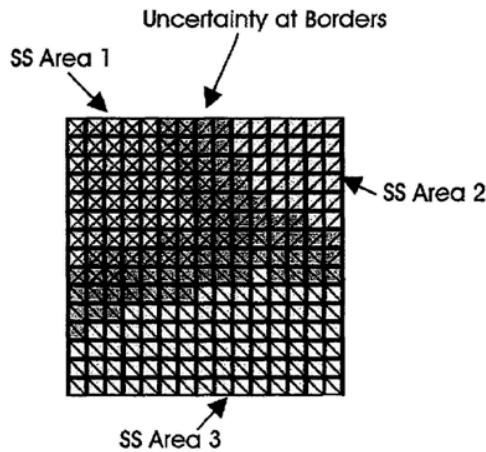


Figure 29 : Incertitude des limites de services dans l'automate cellulaire sur les bassins de dépendances électriques (Fenwick, al., 1998).

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

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

Nous présenterons succinctement deux règles envisageables :

1. Pour chaque poste du réseau $u(B)$ on considère les 2 (ou plus) postes $u(A)$ pour lesquels la distance est moindre. Ce nombre peut par exemple varier en fonction d'analyse plus précise de la distribution statistique des distances d'accès. On peut aussi considérer, par exemple, que, dans le cas où la distance de Delaunay d'un nœud B au nœud A le plus proche est inférieure de plus de deux fois à la distance de Delaunay au second nœud le plus proche, alors ce nœud B appartient exclusivement à un seul nœud A (mono-dépendance) alors que les autres seront définis en termes de pluri appartenance.
2. Dans une logique de pluri-appartenance totale (chaque poste de $u(B)$ dépend partiellement de l'ensemble des postes de $u(A)$). On sort un peu de la logique initiale qui consistait à concentrer l'imprécision spatiale sur les bordures des zones, de manière à postuler une potentielle dépendance totale de l'ensemble du système à chaque poste $u(A)$ pris individuellement. Le niveau d'appartenance est alors relatif à l'inverse de la distance entre les postes.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3.3.4.2. *Modélisation des interdépendances du réseau technique*

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

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

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

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

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

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

			Electricity	Gas	Railways	ICT	Urban Water
Infrastructure characteristics	Complexity	Physical	Red	Green	Yellow	Red	Green
		Organisational	Red	Green	Yellow	Red	Green
		Speed of change	Orange	Green	Yellow	Yellow	Yellow
	Dependence (interconnectedness)	On other infrastructures	Yellow	Green	Red	Red	Yellow
		For other infrastructures	Red	Green	Yellow	Yellow	Yellow
		Intra-infrastructure	Yellow	Green	Yellow	Yellow	Green
		ICT control	Orange	Yellow	Red	Red	Yellow
	Vulnerability	External impact*	Red	Red	Yellow	Green	Yellow
		Technical/human failure	Yellow	Green	Yellow	Red	Green
		Cyber attacks	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Yellow
		Terrorist target	Red	Yellow	Red	Red	Red
	Market environment	Degree of liberalisation	Orange	Orange	Yellow	Green	Yellow
Adequacy of control		Red	Yellow	Yellow	Yellow	Green	
Speed of change		Yellow	Green	Yellow	Yellow	Yellow	
			↓	↓			
Criticality	Degree of criticality – factors	Scope**	Red	Yellow	Yellow	Red	Green
		Magnitude	Red	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
		Effects of time	Red	Green	Yellow	Yellow	Yellow
	Overall degree of criticality	[Red, Green, Yellow, Yellow, Yellow, Red, Green]					
			↻	↻			
Governance	Elements of risk governance – inadequacy of	Awareness	Yellow	Yellow	Green	Yellow	Yellow
		Goal setting	Red	Yellow	Yellow	Red	Green
		Process/means***	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Yellow
	Inadequacy of current risk governance	[Yellow, Red, Yellow, Green, Yellow, Red, Green]					

* Natural hazards, construction work, etc.
 ** Potential of cascading transnational effects
 *** Including actors' participation; responsibility and liability issues

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

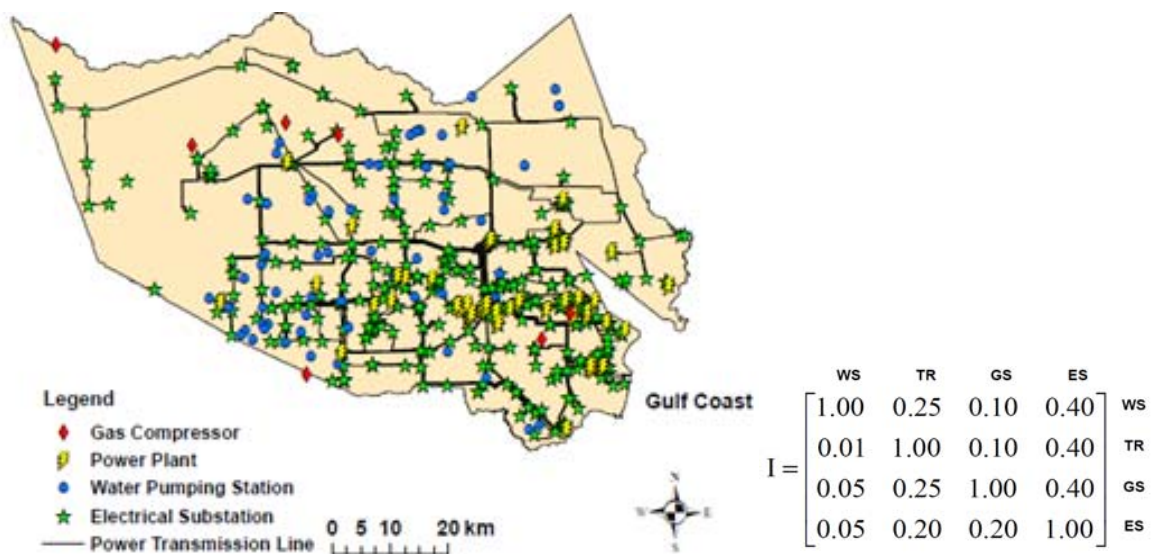


Figure 30 : Réseaux techniques du comté de Shelby et matrice d'interdépendance des réseaux associée (Winkler, Duenas Osorio, al., 2010).

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

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

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

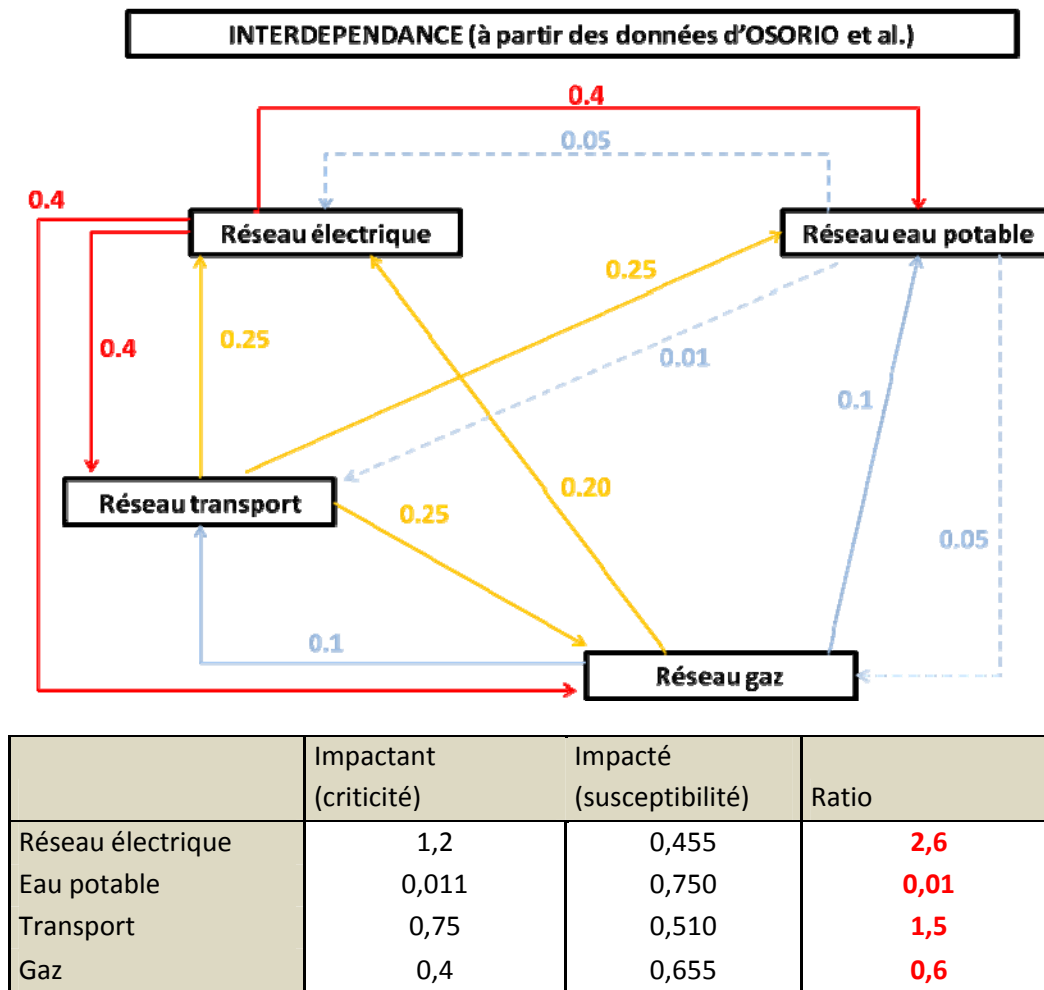


Figure 31 (a) : Représentation graphique des interdépendances de la matrice probabiliste de la figure 30 et (b) estimation des ratios impactant/impacté des réseaux techniques.

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

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

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

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

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

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

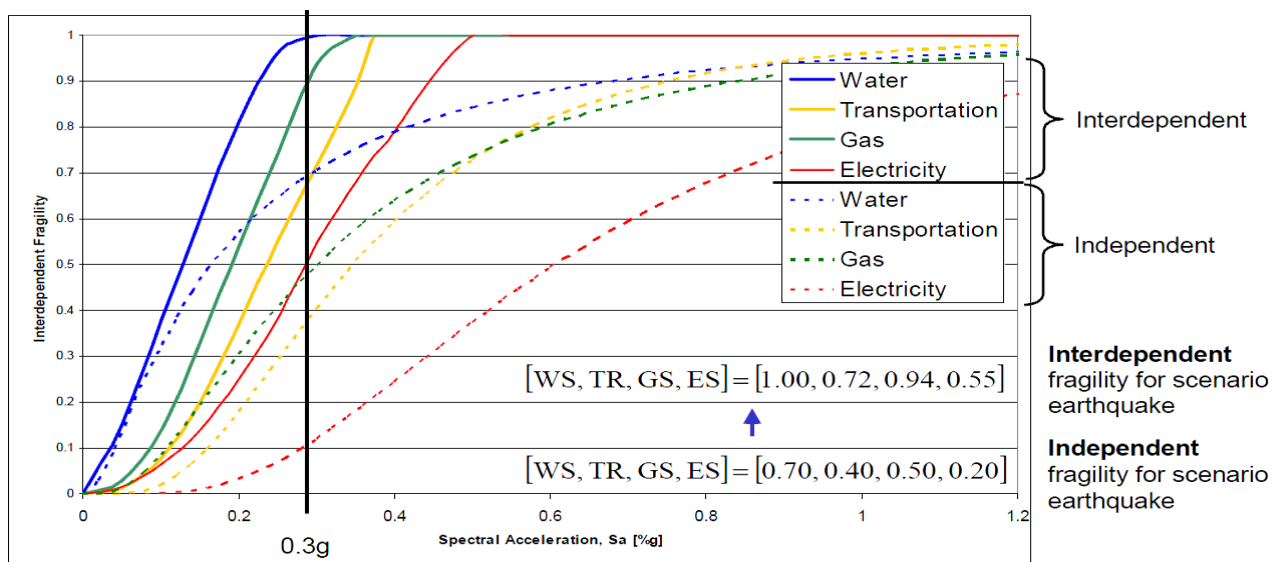


Figure 32 : Courbes de fragilité des réseaux techniques aux perturbations sismiques avec et sans prise en compte des interdépendances entre les réseaux (Source : (Winkler, Duenas Osorio, al., 2010).).

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

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

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

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

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

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