

---

# L'étude des effets dominos de systèmes fortement interdépendants à l'aide de méthodes de Sûreté de Fonctionnement

## Application aux réseaux techniques urbains en cas d'inondation

Serge Lhomme<sup>\*,\*\*</sup> — Damien Serre<sup>\*</sup> — Youssef Diab<sup>\*</sup> — Richard Laganier<sup>\*\*</sup>

*\* Université Paris Est - Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris  
15 rue Fénelon  
75010 Paris*

[Serge.lhomme@eivp-paris.fr](mailto:Serge.lhomme@eivp-paris.fr)

*\*\* Université Paris Diderot-Paris, Sorbonne Paris Cité,  
UMR PRODIG, CNRS  
F-75205 Paris Cedex 13*

---

*RÉSUMÉ. Le développement urbain conjugué au vieillissement des systèmes de protection et aux incertitudes liées au changement climatique compliquent une gestion des risques d'inondation déjà difficile. Dans ce contexte, il existe un réel besoin d'analyser la résilience de systèmes fortement interdépendants, car le bon fonctionnement de la société dépend d'infrastructures critiques fortement interdépendantes. Or, ces infrastructures sont globalement très vulnérables aux risques naturels. C'est pourquoi, une méthodologie a été développée afin de produire des scénarios de défaillance de systèmes fortement interdépendants.*

*ABSTRACT. Quick urban development coupled with technical failures and climate change have increased flood risk and corresponding challenges to urban flood risk management. In this context, there is a need to understand how networked systems are resilient because societal functions are highly dependent on networked systems and the operability of these systems can be vulnerable to disasters. That is why we develop a methodology for producing interdependent networks disturbance scenarios.*

*MOTS-CLÉS: Sûreté de fonctionnement ; Réseaux techniques urbains ; Gestion des risques*

*KEYWORDS: Safety methods; Urban networks; Risk management*

---

## 1. Introduction

La conjonction de nombreux facteurs, croissance urbaine, réchauffement climatique, aversion aux risques de la société, nécessite de repenser la gestion traditionnelle des risques d'inondation. En effet, les coûts économiques liés à ces catastrophes naturelles n'ont cessé d'augmenter (EM-DAT, 2011) et ce malgré les investissements réalisés pour les limiter. C'est pourquoi, si la gestion des risques d'inondation fut très centrée sur l'aléa, se limitant presque exclusivement à des solutions techniques de réduction de l'aléa, elle s'est progressivement orientée vers d'autres concepts, comme la vulnérabilité et plus récemment la résilience (Lhomme et al., 2010). Une des solutions permettant de réduire ces dommages économiques serait d'améliorer la résilience des sociétés.

Cependant, comme les villes modernes sont de plus en plus dépendantes d'infrastructures toujours plus complexes et avancées techniquement (réseaux d'énergie, de télécommunication...), celles-ci semblent de moins en moins résilientes. En effet, les gestionnaires dépendent de services sur lesquels ils n'ont pas les capacités d'agir en cas de dysfonctionnements, alors même que ces services leur sont nécessaires notamment en période de crise. Plus communément, ces services sont considérés comme des infrastructures critiques. Les réseaux techniques sont de bons exemples d'infrastructures critiques. En effet, les réseaux techniques constituent un ensemble d'infrastructures interdépendantes nécessaires au bon fonctionnement du système urbain. Or, ces réseaux de par leurs structures et leurs contraintes d'implantation sont très sensibles aux risques d'inondation. Une étude concernant la résilience des réseaux techniques urbains semble donc nécessaire afin d'améliorer la résilience urbaine.

La modélisation de scénarios de défaillance des infrastructures critiques est alors un enjeu majeur, car ces scénarios permettraient l'identification des éléments pouvant être endommagés suite à une perturbation, entraînant donc des conséquences problématiques.

Dans une première partie, nous justifierons les choix méthodologiques et les hypothèses faites afin d'étudier les interdépendances des infrastructures critiques. Dans une deuxième partie, nous appliquerons cette méthodologie au système des réseaux techniques urbains. Puis dans une troisième partie, l'outil permettant l'exploitation de la méthodologie sera présenté.

## 2. Choix méthodologiques et hypothèses

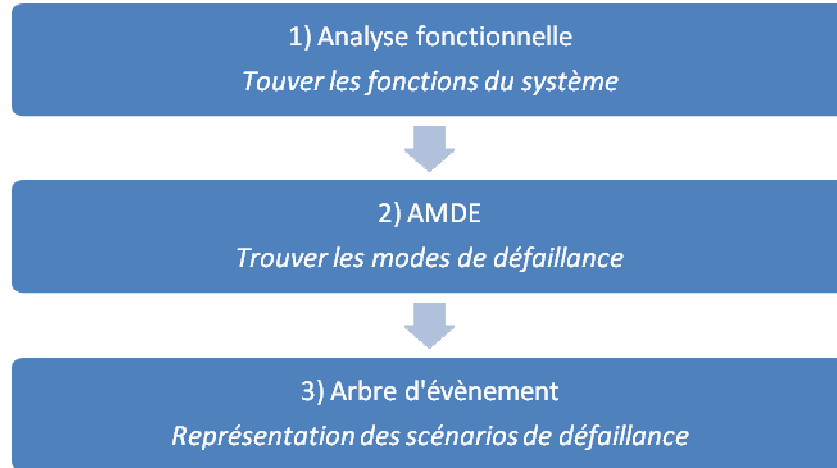
Dans un premier temps, il est nécessaire de définir ce qu'est une infrastructure dite « critique », équivalant ici à la notion anglaise de « critical infrastructure ». Une infrastructure peut être définie comme un ensemble d'installations et de services

nécessaires au fonctionnement de la société (ASCE, 2009). Ces infrastructures sont jugées critiques si leur dysfonctionnement menace la sécurité, l'économie, le mode de vie et la santé publique d'une ville, d'une région voir même d'un état. Ces infrastructures critiques ont la spécificité de dépasser les frontières géographiques, politiques, culturelles et organisationnelles (Boin & McConnell, 2007). En effet, ces infrastructures sont très dépendantes les unes des autres. La méthodologie développée a donc pour principal objectif l'étude des interrelations des ces infrastructures fortement interdépendantes.

S'il existe des méthodes d'analyse de risque physique, statistique (mathématique) ou encore par dire d'expert, il existe aussi des méthodes issues de la sûreté de fonctionnement (Unit, 2011). Comme les approches physiques, la sûreté de fonctionnement est une méthode interne, c'est à dire qu'elle repose sur une connaissance profonde du fonctionnement du système étudié (Serre et al., 2008). Cependant, contrairement à la modélisation physique des processus continus ou discrets de dégradation du système qui repose sur la prise en compte d'équations régissant les phénomènes internes, la modélisation par la sûreté de fonctionnement repose sur le principe de la modélisation fonctionnelle, consistant à déterminer les interactions entre les composants d'un système et son environnement, de façon à établir de manière formelle les liens entre les défaillances des fonctions, leurs causes et leurs effets (Peyras, 2011). L'utilisation de telles méthodes pour analyser des scénarios de défaillance et modéliser des processus d'interdépendance entre systèmes complexes semble alors pertinente.

Cependant, ces méthodes s'appliquent généralement à des systèmes complexes, et non à des systèmes de systèmes complexes, c'est-à-dire à des systèmes fortement interdépendants. L'hypothèse faite ici est qu'il est possible en utilisant une combinaison de méthodes issues de la sûreté de fonctionnement de modéliser des scénarios de défaillance pour des systèmes de systèmes complexes en analysant chaque système plus ou moins indépendamment des autres.

Une méthodologie a alors été proposée, reposant sur l'utilisation de différentes méthodes issues de la sûreté de fonctionnement, afin de produire des scénarios de défaillance de systèmes complexes interdépendants (Serre et al., 2007) (Fig. 1). Dans un premier temps, le principe est de considérer les différentes infrastructures comme faisant partie d'un seul et même système. Une analyse fonctionnelle générale externe est alors produite. Ce n'est que dans un deuxième temps qu'une analyse fonctionnelle interne est réalisée pour chaque infrastructure critique et que les méthodes de sûreté de fonctionnement sont appliquées. Ainsi, ce deuxième niveau d'analyse prend en compte le premier niveau plus général, ce qui implique la prise en compte des interrelations entre les différents systèmes complexes.



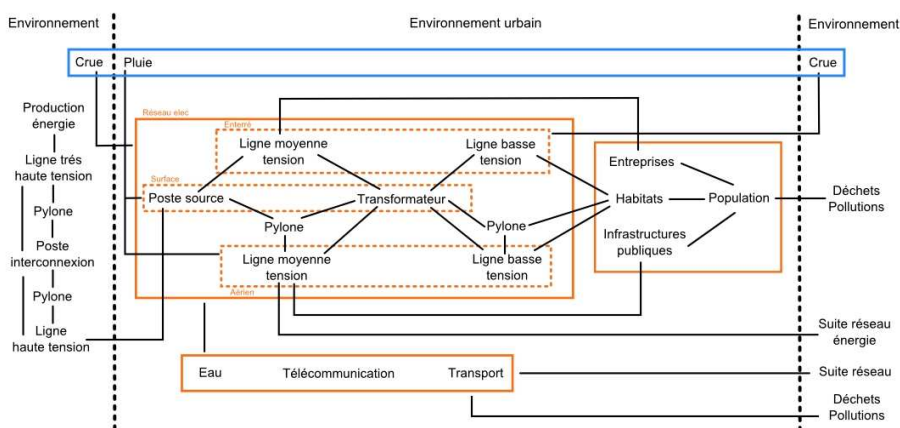
**Figure 1.** La méthodologie générale (Serre et al., 2007)

L'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE) a été choisie pour étudier les modes de défaillance, car elle permet une analyse exhaustive de ceux-ci. C'est une méthode inductive d'analyse des défaillances potentielles d'un système. Elle considère chacun des composants du système et analyse ses modes de défaillance. Elle repose sur le recensement systématique et l'évaluation des risques potentiels d'erreurs susceptibles de se produire à toutes les phases de réalisation d'un système. Depuis la fin des années 90, l'AMDE a été adaptée dans différents domaines du génie civil (Serre et al., 2007). Elle aboutit à l'élaboration d'un tableau qui pour chaque composant établit les causes et les effets de la perturbation du composant. Théoriquement, l'AMDE ne peut mettre en évidence les conséquences de pannes combinées. Pour cela, il faudra utiliser les arbres d'évènement.

### **3. Application aux réseaux techniques urbains face aux risques d'inondation**

Dans cette partie, l'objectif est d'appliquer la méthodologie définie, dans la partie précédente, aux réseaux techniques urbains. Pour permettre l'application de la méthodologie, ces systèmes techniques ont été divisés en quatre catégories : les réseaux d'énergie, les réseaux de transport, les réseaux d'eau, les réseaux de télécommunication. Dans un premier temps, une analyse fonctionnelle externe a été réalisée pour l'ensemble des réseaux techniques urbains. L'objectif est d'établir l'ensemble des fonctions communes que remplissent les réseaux techniques urbains par rapport à leur environnement (transporter des flux, résister à des pressions extérieures...). Cette analyse fonctionnelle externe s'appuie sur une modélisation générique du système urbain dans lequel les réseaux ont une place centrale.

Des analyses fonctionnelles internes ont alors pu être réalisées pour les quatre grandes familles de réseaux. Ces analyses reposent sur des analyses structurelles qui ont pour objectif de déterminer l'ensemble des composants des différents systèmes. Suite aux analyses structurelles des différents réseaux, il est alors possible de procéder à l'analyse fonctionnelle. Ces fonctions expriment les interactions des composants entre eux, mais aussi les interactions avec leur environnement. Ces interactions sont matérialisées à l'aide de schémas : les Blocs Diagrammes Fonctionnels (BDF) (Fig. 2).

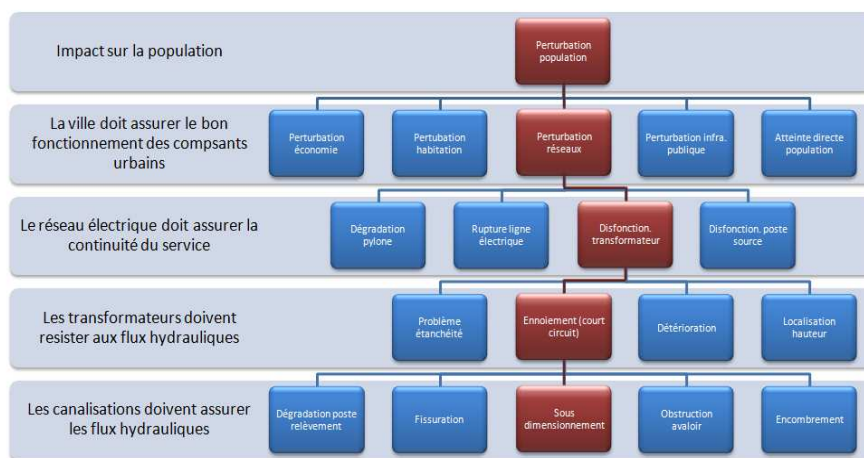


**Figure 2.** BDF contact du réseau électrique qui montre la décomposition structurelle du réseau électrique ainsi que les relations de contact entre ces composants.

A partir des BDF réalisés, les fonctions réalisées par les composants des différents réseaux ont été déterminées, dans le cas particulier des risques d'inondation (assurer la continuité du service, résister aux flux hydrauliques, assurer les flux hydrauliques, résister aux pressions mécaniques, permettre le bon fonctionnement des autres composants du système urbain). L'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets a été effectuée afin de déterminer les fonctions accomplies par chaque composant, leurs modes de défaillance susceptibles d'apparaître aux différents cycles de vie du système, leurs causes et leurs conséquences. Ainsi, outre la connaissance précise des séquences de défaillance des différents réseaux, l'AMDE va alors permettre de structurer les informations relatives aux perturbations de chaque système. Sont alors successivement étudiés : les impossibilités d'un élément à accomplir une fonction requise; les effets par lesquels une défaillance est observée sur un élément du système ; les événements qui conduisent aux modes de défaillance ; les conséquences associées à la perte de l'aptitude d'un élément à remplir une fonction requise.

A partir de ces AMDE, des scénarios de défaillance qui tiennent compte de l'interdépendance des différents réseaux ont été produits (Fig. 3). Cependant,

l'AMDE est une méthode exhaustive. Ainsi, sachant que l'on détermine plusieurs causes et effets pour un composant et que nous disposons de plus d'une trentaine de composants répartis sur quatre réseaux différents, le nombre important de scénarios pouvant être produit permet difficilement d'être exhaustif quant à leur production. Une solution doit alors être recherchée afin de tenir compte de cette complexité. De plus, cette première approche reste qualitative. Tous les scénarios sont jugés possibles sans pour autant chercher à identifier les plus probables. L'objectif est ici de recenser exhaustivement ces scénarios.



**Figure 3.** Exemple d'un scénario pouvant être produit

#### 4. Un outil et une validation

Compte tenu du nombre de scénarios pouvant être produit, il s'est trouvé nécessaire d'automatiser la production des scénarios de défaillance. En effet, le choix méthodologique qui a conduit à utiliser l'AMDE se justifie par le besoin d'effectuer une analyse exhaustive des modes de défaillance. A ce stade, il était possible de faire appel à des experts, afin de retenir les scénarios les plus probables ou bien les plus critiques. Cependant, ce choix aurait remis en question l'utilisation d'une méthode aussi exhaustive, car l'exhaustivité de l'AMDE ne serait pas mise à profit. Le développement d'un outil informatique s'est alors imposé.

Pour permettre cette automatisation, la décision a alors été prise de constituer une base de données contenant les résultats de l'AMDE (Fig. 4). Cependant, avant l'intégration de cette AMDE dans une base de données, il a été nécessaire de dresser une typologie des causes et des effets. En effet, le lien entre la défaillance d'une

fonction et une autre a été évoqué, mais pour que ce lien soit automatisé, une typologie précise a dû être définie. C'est seulement une fois cette typologie définie, qu'un algorithme a pu être développé afin d'établir l'ensemble des relations de causes à effets « directes » entre toutes les fonctions de tous les composants (Fig. 5). Les relations de causes à effets directes sont des liens directs de défaillance entre les différentes fonctions.

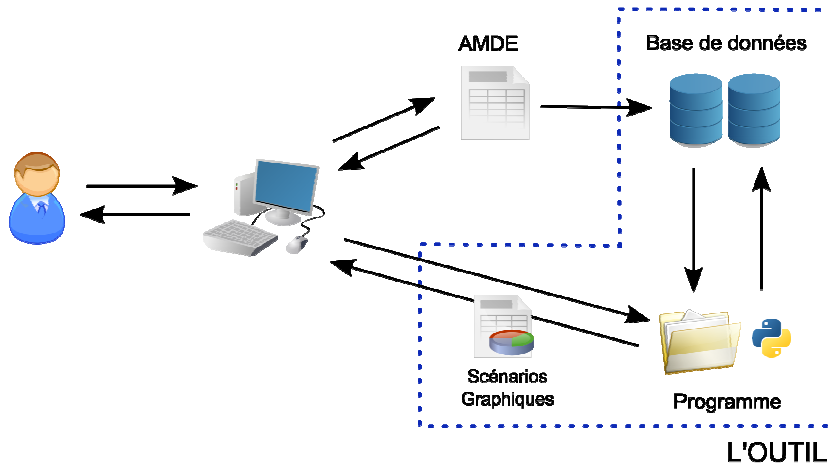


Figure 4. Architecture de l'outil

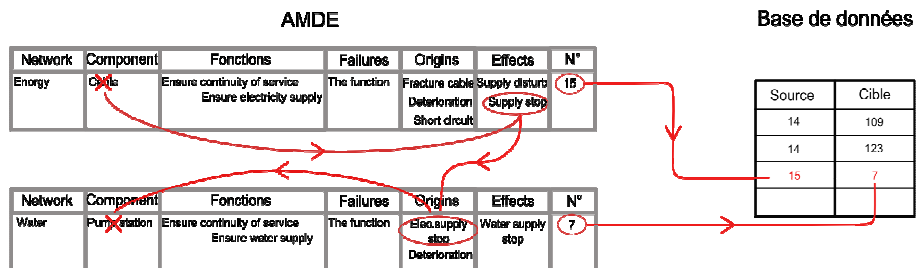


Figure 5. Algorithme permettant l'automatisation des scénarios. Cet algorithme permet la mise en relation des composants établie grâce à l'AMDE sous forme de graphe.

Une fois ces relations de causes à effets directes établies, il a été nécessaire d'établir une méthodologie permettant de tenir compte de tous les scénarios pouvant être produits. Ici, il est nécessaire de préciser notre objectif. L'objectif est de disposer d'une méthodologie permettant d'établir l'ensemble des interdépendances entre les composants des différents réseaux. L'objectif n'est donc pas de produire tous les scénarios. Un algorithme a alors été mis au point afin de tester toutes les

combinaisons possibles entre les différentes fonctions des différents composants (fonction 1 et fonction 2, puis fonction 1 et fonction 3, [...], puis fonction n et fonction n-1) et de tester s'il existait au moins une relation de causes à effets pour chacune des combinaisons. En l'occurrence, la relation recherchée est la solution la moins couteuse en temps de calcul : c'est-à-dire la relation la plus directe, autrement dit celle qui implique le moins de fonctions. Cela revient à rechercher des plus courts chemins sur un graphe. (Fig. 6). Nous pouvons alors établir les défaillances pouvant être déduites suite à la perturbation d'un composant. Inversement, il est possible d'établir les causes pouvant provoquer la défaillance d'une fonction.

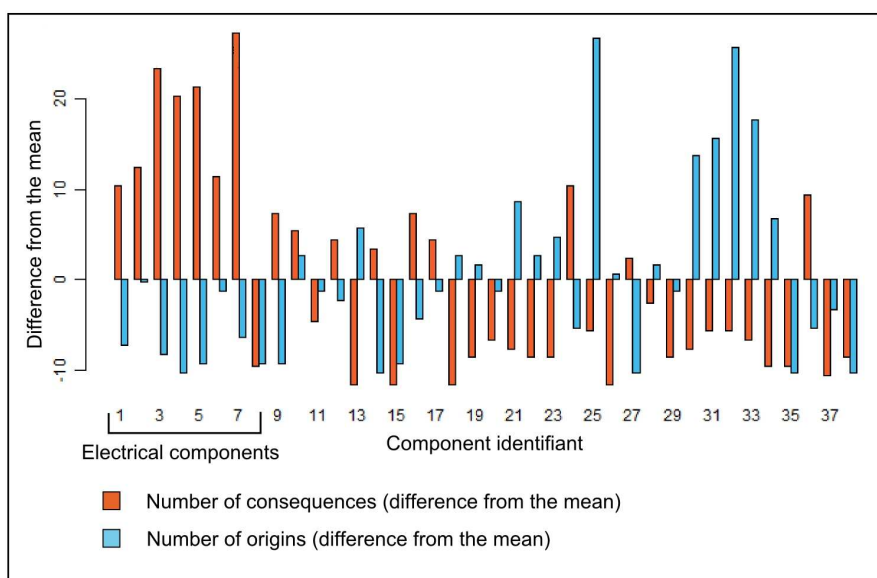
Numero	Composant	Fonction	Numero pert	Composant Perturbe	Fonction Perturbe
1	Ligne MT entere	Assurer le transport d'électricité	7	Ligne BT entere	Fournir l'énergie aux autres composants urbains
			18	Ligne BT aerienne	Livrer l'électricité aux composants urbains
			28	Transformateur ep	Permettre le transport d'électricité; Adapter la tension; Permettre la distribution d'électricité
			30	Poste de relevement ep	Assurer le relèvement d'eau potable; Permettre le transport deau potable
			37	Canalisation AEP	Livrer l'eau jusqu'aux particuliers
			39	Reservoir (chateau eau)	Transmettre les flux hydrauliques
			47	Canalisation	Evacuer les flux hydrauliques
			51	Poste de relevement	Assurer le relèvement des eaux usées; Permettre le transport
			54	Station epuration	Assurer le traitement des eaux usées; Recycler dans le milieu naturel
			57	Station epuration	Traiter l'eau avant retour dans l'environnement
			61	Borne	Assurer la demande en communication
			62	Repartiteur	Permettre le transport des communications; Permettre la distribution des communications
			65	CAA	Permettre le transport des communications; Permettre la distribution des communications
			68	CAA	Assurer la demande en communication
			72	Cable entere	Assurer la demande en communication
			75	Cable aerien	Assurer la demande en communication
			79	Chaussee	Permettre le transport des véhicules
			80	Chaussee	Résister aux pressions hydromécaniques de la crue; Eviter la submersion
			82	Chaussee	Assurer la croulution (les échanges) de flux
			84	Trottoir	Résister aux pressions hydromécaniques de la crue; Eviter submersion
			93	Renardavalnir	Assurer le bon fonctionnement du réseau

**Figure 6.** Exemple d'effets pouvant être provoqués (à droite) par la perturbation d'une fonction d'un composant (à gauche).

Comme chacun des scénarios ne peut pas être vérifié, ou bien comme il est difficile d'assurer qu'aucun scénario n'a été omis, la validation de notre méthode et de notre application est difficile à établir. La confrontation des résultats avec ce qui se produira sur des terrains d'expérience sera la meilleure validation. En attendant, il est possible de s'appuyer sur des études très générales concernant l'analyse des vulnérabilités des réseaux effectuée lors de retours d'expérience. Pour cela, une étude statistique a été réalisée sur les scénarios produits par l'outil. Chaque scénario a été comptabilisé et regroupé pour que les résultats concernent des composants et non plus des fonctions. Le résultat de cette étude statistique fait émerger trois



conclusions principales. Premièrement, le réseau électrique se révèle être très agressif envers les autres réseaux (Fig. 7). Deuxièmement, il est clairement identifié une distinction entre des éléments agressifs (à l'origine de beaucoup de scénarios) et des composants sensibles (à la conclusion de nombreux scénarios possibles). Troisièmement, il ressort que des composants particuliers jouent un rôle primordial dans les défaillances en chaîne, car ils vont diffuser la défaillance d'un réseau à un autre (par exemple, une station de relevage va diffuser une défaillance d'origine électrique au réseau d'eau). Ces conclusions obtenues à partir d'une méthodologie purement théorique recourent des conclusions issues de retour d'expérience (Etablissement Public Loire, 2006), ce qui semble donc valider notre méthodologie.



**Figure 7.** Illustration des statistiques obtenues montrant l'agressivité du réseau électrique envers les autres composants – l'écart à la moyenne des scénarios obtenus

## 5. Conclusion

La méthodologie définie dans cette recherche et appliquée aux réseaux techniques urbains semble permettre de tenir compte des interdépendances entre différents systèmes et ainsi de produire des scénarios de défaillance pour des systèmes fortement interdépendants. Si la validation de cette méthodologie reste problématique, la méthodologie présentée constitue une alternative à des méthodes plus mathématiques ou liées à de l'expertise. Ainsi, cette méthodologie semble

pouvoir être appliquée à d'autres systèmes d'infrastructures critiques. L'outil développé permet alors de réellement bénéficier de l'exhaustivité de l'AMDE qui constitue l'élément central de la méthodologie. Cependant, cette exhaustivité est relative à la qualité de l'AMDE réalisée. Or, il est toujours très difficile d'évaluer la qualité d'une AMDE, celle-ci doit être réalisée avec attention et reposer sur une typologie des causes et des effets.

Par la suite cette méthodologie, appliquée ici aux réseaux techniques urbains, sera intégrée dans un outil SIG afin de spatialiser l'information obtenue et de tenir compte de la configuration des réseaux. Ainsi, en confrontant un zonage de l'aléa par rapport à l'état existant de différents éléments des réseaux techniques urbains, les éléments directement impactés par l'aléa peuvent être identifiés. Puis, en appliquant la méthodologie présentée, il sera possible d'établir les interdépendances entre les différents réseaux, et ainsi de déterminer les effets produits par les dommages puis de les spatialiser.

## **Bibliographie**

- ASCE, 2009, Guiding Principles for the Nation's Critical Infrastructure, p 42.
- Boin A., McConnell A., 2007, Preparing for Critical Infrastructure Breakdowns: The Limits of Crisis Management and the Need for Resilience, Journal of Contingencies and Crisis Management, 10p.
- EM-DAT, 2011, consulté le 18 Mars 2011, <http://www.emdat.be/natural-disasters-trends>, The International Disaster Database, Center for Research on the Epidemiology of Disasters - CRED
- Etablissement Public Loire, 2006, Etude préalable à la réduction de la vulnérabilité des réseaux liée aux inondations en Loire moyenne : Résultats, bilan et perspectives, 180p.
- Gervais R., Peyras L., Serre D., Chouinard L., Diab Y., 2011. Condition evaluation of water retaining structures by a functional approach: comparative practices in France and Canada, In European Journal of Environmental and Civil Engineering, Volume 15 - No. 3/2011, pp. 335-356.
- Lhomme S., Serre D., Laganier R., Diab Y., 2010. Les réseaux techniques face aux inondations ou comment définir des indicateurs de performance de ces réseaux pour évaluer la résilience urbaine, Bulletin de l'Association des Géographes Français, 10p.
- Serre D., Peyras L., Tourment R., Diab Y., 2008. Levee performance assessment: development of a GIS tool to support planning maintenance actions, Journal of Infrastructure System, ASCE, Vol. 14, Issue 3, pp. 201-213.
- Serre D., Peyras L., Curt C., Boissier D, Diab Y., 2007. Assessment of civil engineering hydraulic infrastructures, Canadian Geotechnical Journal, n°44, pp. 1298-1313
- UNIT, 2011, [http://webdav-noauth.unit-c.fr/files/perso/hniandou/cyberrisques2/etage\\_3\\_aurelie/co/Module\\_Etage\\_3\\_synthese.html](http://webdav-noauth.unit-c.fr/files/perso/hniandou/cyberrisques2/etage_3_aurelie/co/Module_Etage_3_synthese.html), consulté le 18 Mars 2011.