

Système d'information géographique pour l'évaluation de la vulnérabilité au risque de ruissellement urbain

Geographical information system for the assessment of vulnerability to urban surface runoff

Aleksandra Barczak, Camille Grivault

Laboratoire THéMA, UMR 6049

2, bd Gabriel, 21000 Dijon

[aleksandra.barczak, camille.grivault}@u-bourgogne.fr](mailto:{aleksandra.barczak, camille.grivault}@u-bourgogne.fr)

RESUME

Cette étude a pour objectif de contribuer au développement de méthodes d'analyse de la vulnérabilité des territoires urbains face à un épisode de ruissellement pluvial. La méthodologie, appliquée à l'agglomération dijonnaise, consiste à identifier et à quantifier les enjeux à l'aide d'un système d'information géographique. Le poids de chaque élément exposé dans la vulnérabilité globale a été estimé grâce à la méthode hiérarchique multicritère (MHM). Le résultat se présente sous forme d'un indice de vulnérabilité spatialisé et synthétique, mais laissant la possibilité d'effectuer une interrogation analytique.

ABSTRACT

The aim of this article is to develop and evaluate the methods for a surface runoff assessment and its potential consequences in an urban environment on the case of city Dijon (France). The applied methodology is based on identifying and quantifying stakes by means of geographical information system. Thanks to the multicriteria method (AHP) applied during the research, the weight of each exposed element could have been assessed. The investigation presented in this paper yielded in a spatialized global vulnerability index, while permitting an analytic query.

MOTS CLES

Analyse multicritère, base de données spatio-temporelles, ruissellement urbain, système d'information géographique, vulnérabilité

1 INTRODUCTION : LA VULNERABILITE DANS L'ANALYSE DU RISQUE DE RUISSELLEMENT URBAIN

Le ruissellement pluvial urbain se manifeste à travers les inondations à cinétique rapide, dangereuses par leur ampleur et difficile à gérer par leur soudaineté. Ce risque, étroitement lié au phénomène d'imperméabilisation des sols, concerne non seulement les régions où les caractéristiques hydro-climatiques favorisent ce type de réponse hydrologique (méditerranéen), mais plus généralement les territoires affectés par un processus d'étalement et de densification des tissus urbains.

Pour étudier le comportement des bassins versant urbains face aux inondations rapides, l'hydrologie urbaine dispose de multiples outils basés sur la modélisation hydrologique. Cependant dans le domaine de l'évaluation de leurs conséquences les concepts et les méthodes restent encore peu formalisés. C'est dans ce contexte que cette communication propose une approche synthétique de la vulnérabilité qui permet d'appréhender la vulnérabilité dans son ensemble et de rendre compte de ses aspects plus qualitatifs (d'Ercole 1994).

La mise en place d'une analyse globale de la vulnérabilité exige l'intégration de nombreuses informations concernant les enjeux humains, matériels, environnementaux. Cette étape d'inventaire des éléments exposés est suivie par la détermination pour chacun d'eux de facteurs de vulnérabilité. Ces facteurs doivent ensuite être agrégés pour constituer un zonage intégral qui exprimera la vulnérabilité globale d'un territoire (D'Ercole 1994). A cette dernière étape, nous sommes confrontés à la difficulté de cartographier cette information spatiale de synthèse sans perdre de vue les relations entre les composantes de la vulnérabilité (Propeck-Zimmermann 2003).

L'analyse de la vulnérabilité face au ruissellement proposée et appliquée à l'agglomération dijonnaise cherche à produire un indicateur global de vulnérabilité à travers l'application de la méthode d'analyse hiérarchique multicritère. L'utilisation d'un système d'information géographique nous permettra de spatialiser les éléments exposés et d'aboutir à une cartographie synthétique tout en permettant l'interrogation analytique (vulnérabilité humaine, matérielle, environnementale).

2 APPLICATION DE L'ANALYSE HIERARCHIQUE MULTICRITERE A L'ETUDE DE LA VULNERABILITE

2.1 Les méthodes multicritères dans l'analyse de la vulnérabilité

Les méthodes multicritères s'utilisent habituellement dans le domaine du management d'entreprise ou de projet lorsqu'un ou plusieurs décideurs se trouvent confrontés à des problèmes de choix ou d'évaluation dans des situations complexes. Dans le cadre de cette étude l'objectif n'est pas de choisir une ou plusieurs solutions, mais de hiérarchiser différentes cibles en fonction de leur vulnérabilité face au risque d'inondation par ruissellement.

Les méthodes multicritères ont déjà été utilisées à plusieurs reprises en matière d'évaluation de la vulnérabilité d'un territoire. En matière de risque d'inondation, les méthodes hiérarchiques multicritères (MHM) ont été utilisées pour comparer la vulnérabilité de différents sites en fonction de critères socio-économiques, hydrauliques et de l'organisation des secours (Graillet *et al.* 2000). Des méthodes du même type ont été utilisées pour évaluer la vulnérabilité d'un territoire face au risque de transport de matières dangereuses afin d'apporter une aide à la décision aux acteurs chargés de l'organisation des secours (Griot *et al.* 2001). Enfin, plus récemment, le projet européen ARAMIS utilise une MHM pour évaluer la vulnérabilité des territoires péri-industriels. En nous inspirant largement de cette dernière

expérience nous proposons d'utiliser la MHM couplées à l'analyse spatiale pour obtenir une évaluation semi-quantitative de la vulnérabilité d'une agglomération urbaine au risque de ruissellement à l'aide d'un système d'information géographique.

La méthode retenue est l'analyse multicritère hiérarchique mise au point par T. Saaty (Saaty 1980). Cette méthode présente l'intérêt de proposer un modèle facilement compréhensible d'organisation des données reflétant la tendance naturelle de l'esprit à trier les éléments d'un système en différents niveaux et à regrouper les éléments semblables sur un même niveau afin de résoudre des problèmes non structurés. Par ailleurs, elle fournit une méthode souple permettant d'établir des priorités et de les restituer aux différents niveaux de la hiérarchie et autorise une évaluation de la cohérence logique des avis utilisés pour déterminer les priorités. Cette méthode permet enfin de sélectionner la meilleure solution en fonction des objectifs établis en élaborant un compromis représentatif des divers avis exprimés.

2.2 Elaboration de l'arborescence et calcul des priorités

La première étape de la méthode d'analyse hiérarchique multicritère consiste à construire une hiérarchie qui vise à décrire le système étudié. La hiérarchie (fig.1) créée propose une vision structurée du problème en terme d'objectif, de critères, de sous-critères et d'alternatives.

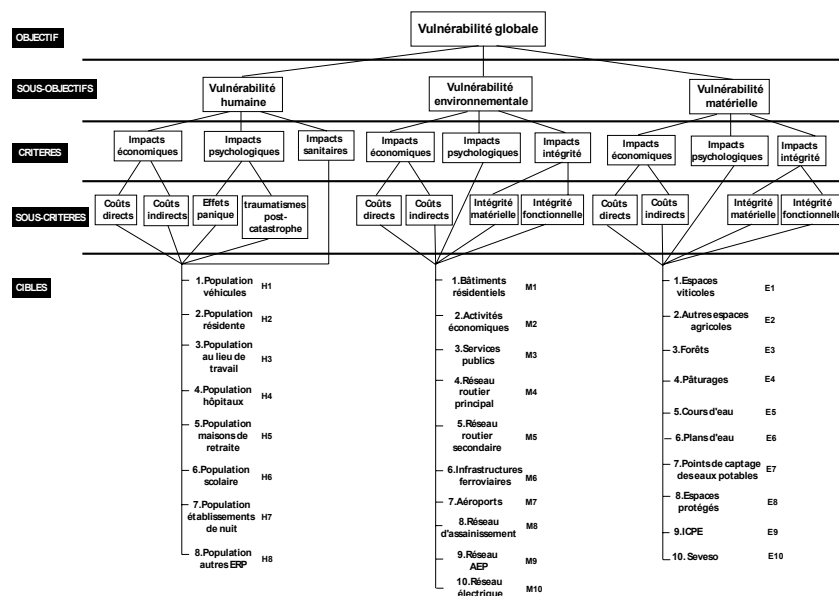


Figure 1 : Structure hiérarchique de la vulnérabilité

L'évaluation de la vulnérabilité globale d'un territoire passe par l'évaluation de la vulnérabilité des cibles humaines, environnementales et matérielles. Leur vulnérabilité est fonction des impacts du ruissellement sur celles-ci.

Trois types d'impacts ont été retenus comme critères, eux-mêmes subdivisés en sous-critères. Les impacts sanitaires ou d'intégrité expriment les effets du ruissellement sur l'intégrité des cibles humaines, environnementales ou matérielles. Pour ces deux derniers types de cibles les impacts d'intégrité ont été divisés en deux sous-impacts selon que le ruissellement affecte l'intégrité physique ou fonctionnelle (capacité de la cible à assurer sa fonction après avoir été impactée) de la cible. Les impacts économiques expriment les effets du ruissellement sur les cibles en terme de

coûts qui peuvent être directs (coûts liés à la destruction de la cible) ou indirects (coûts de réhabilitation, perte d'exploitation, chômage technique...). Enfin, les impacts psychologiques expriment les effets en terme d'influence sur un groupe de personnes. Pour les cibles humaines, deux types d'impacts psychologiques ont été identifiés : l'effet de panique et les traumatismes post-catastrophe.

Au dernier niveau de la hiérarchie se trouvent les alternatives qui correspondent ici aux cibles humaines, matérielles et environnementales susceptibles d'être impactées.

La hiérarchie proposée n'est pas définitive mais sera enrichie par l'introduction d'autres critères de vulnérabilité relatifs à l'organisation des secours et à la susceptibilité du territoire au ruissellement (coefficients de ruissellement, pentes etc.).

La seconde étape de la méthode consiste à évaluer les priorités à partir du jugement d'experts. Les jugements ont été effectués par nous-mêmes à partir de connaissances recueillies sur les impacts des inondations principalement dans l'ouvrage de Gilles Hubert et Bruno Leroux sur les coûts du risque (1999). Par la suite, les jugements seront effectués par les acteurs impliqués dans la gestion du risque (experts de la DDE, de la DIREN et différents élus locaux).

Enfin, la cohérence des jugements a été évaluée afin de valider les priorités obtenues et dans le cas contraire de réviser nos appréciations.

3 MODELE DE DONNEES ET INTEGRATION DE L'INFORMATION DANS UN SIG

3.1 Structuration des données à l'aide d'un modèle conceptuel

Les données nécessaires pour réaliser l'étude ont été collectées auprès des différents services de la communauté d'agglomération du Grand Dijon, de certains services déconcentrés de l'Etat (DRIRE, DIREN, sécurité civile, Rectorat), ainsi que dans quelques bases de données commerciales de l'INSEE, de l'IGN et de la DGI. Ces sources de données sont présentées en détail dans le tableau ci-dessous (fig.2).

Cibles humaines	Population résidente	Population lieu de travail	Population véhicules	Population hôpitaux	Population établissements de nuit	Population scolaire	Population maison de retraite	Population autres ERP		
Sources	BD ILÔT (INSEE), DGI	BD SIREN (INSEE)	Service voirie Dijon	Préfecture	Préfecture	Rectorat	Préfecture	Préfecture		
Cibles environnementales	Pâturages	Forêts	Espaces agricoles	Espace viticoles	Plans d'eau	Cours d'eau	Espaces protégés	ICPE	Seveso	Points de captage
Sources	Image satellite ERS	Image satellite ERS	Image satellite ERS	Image satellite ERS	Cadastré	Cadastré	DIREN	DRIRE	DRIRE	BD CARTHAGE
Cibles matérielles	Bâtiments résidentiels	Activités	Services publics	Aéroport	Infrastructures ferroviaire	Routes principales	Routes secondaires	Réseau d'assainissement	Réseau AEP	Réseau électrique
Sources	Bâti (Grand Dijon), DGI	Bâti (Grand Dijon), SIREN	Bâti (Grand Dijon), SIREN	Cadastré	Cadastré, route 500	Cadastré, Route 500	Cadastré, Route 500	Grand Dijon	Grand Dijon	BD Route 500

Figure 2 : Sources de données utilisées.

Ces données hétérogènes ont ensuite été structurées dans un modèle conceptuel de données qui a pour objectif de représenter la réalité étudiée en proposant une description précise des objets que l'on souhaite retenir, de leurs caractéristiques et de leurs relations. Le modèle (fig.3) a été divisé en deux sous-ensembles :

- le sous-ensemble *territoire* rassemblant des informations concernant le territoire dans ses composantes matérielle (parcelles, bâtiments, adresses, routes et réseaux urbains) et fonctionnelle (activités, populations et leurs déplacements).
- le sous-ensemble *enjeux* décrivant les éléments humains, environnementaux et matériels susceptibles d'être impactés par un aléa est connecté avec le sous-modèle territoire par les classes parcelle et réseaux urbains.

Les enjeux permettent d'évaluer les différents types de vulnérabilité pour aboutir à un indicateur synthétique à partir des priorités déduites de l'analyse multicritère.

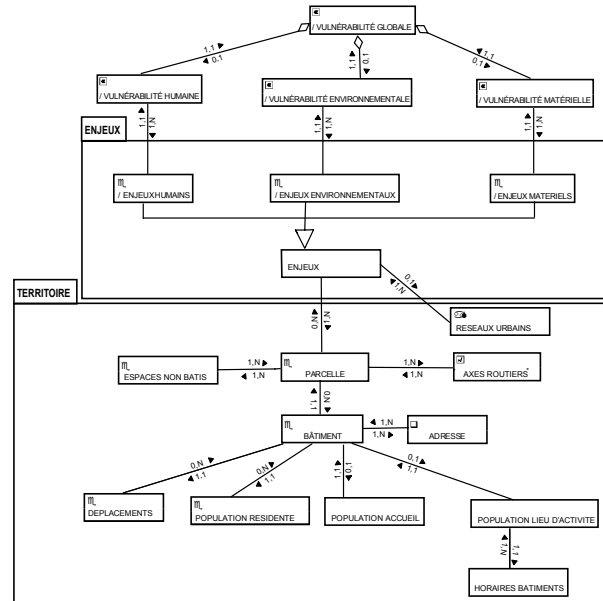


Figure 3 : Modèle conceptuel de données simplifié.

3.2 Quantification des cibles

3.2.1 Intégration et quantification des cibles humaines

Les cibles humaines ont fait l'objet d'un traitement particulier permettant de rendre compte des variations de leur répartition au cours d'une « journée type ». La méthode proposée passe par quatre grandes étapes.

Des potentiels d'émission et de réception sont évalués pour chacun des bâtiments présents sur la zone d'étude. Trois types de potentiels ont été déterminés pour chaque bâtiment : un potentiel résidentiel, un potentiel d'emploi et un potentiel d'accueil. Ces potentiels permettront par la suite de répartir les déplacements dans les bâtiments.

Le potentiel résidentiel (P_r) a été calculé à partir de la population des îlots (P_i), du nombre de logements des îlots (L_i), du nombre de logements des parcelles (L_p), de la surface des bâtiments (S_b) et de la surface du bâti résidentiel des parcelles selon la formule suivante :

$$P_r = \frac{(S_b \div S_p) \times L_p}{L_i} \times P_i \quad (1)$$

Le potentiel d'emploi (P_e) a été calculé à partir du nombre d'emplois des parcelles (E_p), de la surface des bâtiments (S_b) et de la surface du bâti des activités des parcelles (S_p) selon la formule suivante : $P_e = (S_b \div S_p) \times E_p$ (2)

Le potentiel d'accueil correspond à la capacité des établissements recevant du public (ERP).

Les horaires d'ouverture et de fermeture des activités économiques de l'agglomération ont été obtenus par l'intermédiaire d'une enquête réalisée sur un échantillon de 500 activités. La tranche horaire la plus fréquente a été retenue et attribuée aux autres activités du même type selon la nomenclature NAF60. Pour les bâtiments publics, un échantillon a été constitué et élargi aux autres bâtiments du

même type selon le même procédé. Les horaires des établissements scolaires sont, quant à eux, connus de manière exhaustive. Pour chaque bâtiment et chaque potentiel les horaires sont codés dans des tranches horaire d'une demi-heure de manière binaire (0 : ouvert ; 1 : fermé).

Le traitement de « l'Enquête Ménage Déplacement » porte sur les 1400 individus enquêtés le mardi et le jeudi pour obtenir les déplacements sur une « journée type » après redressement environ 700 000 déplacements sont comptabilisés. Pour chaque motif de l'enquête ménage des matrices sont construites afin d'obtenir pour chaque secteur du découpage de l'enquête une matrice de soldes correspondant à la différence entre les déplacements émis et reçus par la zone dans des tranches horaires d'une demi-heure.

Enfin, la ventilation des matrices de soldes dans les bâtiments a été effectuée proportionnellement aux potentiels des bâtiments ouverts dans chaque tranche horaire et pour chaque secteur de l'enquête. La matrice de soldes du motif résidentiel a été ventilée en fonction du potentiel résidentiel, celle du motif travail en fonction du potentiel d'emploi, les autres motifs selon le potentiel d'accueil.

Au terme de ces traitements, nous obtenons un effectif de populations pour chaque bâtiment de la zone d'étude aux différents moments de la journée. Les effectifs de chacune des cibles identifiées à partir de la fonction des bâtiments ont été normalisés afin d'aboutir à une quantification des cibles à l'intérieur de mailles de 50 mètres sur 50 mètres couvrant la totalité de la zone d'étude.

Pour la cible H1, le facteur de quantification est le suivant :

$H = T/T_{\max}$ (3) où T- trafic du tronçon routier traversant la maille et T_{\max} - trafic maximum observé sur un tronçon routier de la zone d'étude.

Pour les autres cibles, le facteur de quantification est le suivant :

$H = N/N_{\max}$ où (4) N- nombre de personnes présentes dans la maille et N_{\max} - nombre maximum de personnes présentes dans une maille de la zone d'étude.

3.2.2 La quantification des cibles matérielles et environnementales

Les facteurs de quantification des cibles matérielles sont les suivants :

Pour les cibles M4, M5, M6 et M7 : $M = S/S_{\max}$ (5) où S- surface de la cible présente dans la maille et S_{\max} - surface maximale de la cible dans une maille de la zone d'étude.

Pour les cibles M8 et M9 et M10 : $M = L/L_{\max}$ (6) où L- longueur de la cible présente dans la maille et S_{\max} - longueur maximale de la cible dans une maille.

Pour les cibles M2 et M3 : $M = E/E_{\max}$ (7) où E- nombre d'emplois présents dans la maille et E_{\max} - nombre maximum d'emplois présents dans une maille.

Pour la cible M1: $M = Lo/Lo_{\max}$ (8) où Lo- nombre de logements présents dans la maille et Lo_{\max} - nombre maximum de logements présents dans une maille.

Les facteurs de quantification des cibles environnementales sont les suivants :

Pour la cible E7 : $E = P/P_{\max}$ (9) où P- prélèvements du point de captage situé dans la maille et P_{\max} - prélèvement maximum observé pour un point de captage.

Pour les autres cibles : $E = S/S_{\max}$ (10) où S- surface de la cible présente dans la maille et S_{\max} - surface maximale de la cible dans une maille.

4 PREMIERS RESULTATS

4.1 Restitution des résultats issus de l'analyse multicritère

Pour déterminer les priorités, les vecteurs propres des matrices de jugements ont été

calculés. La cohérence des jugements a été déterminée à partir du ratio de cohérence. Pour les 40 questionnaires ce ratio est inférieur à 10% validant ainsi les priorités établies. Ces priorités multipliées par les facteurs de quantification déterminés précédemment permettent de construire les fonctions de vulnérabilité. La fonction de vulnérabilité globale représentée par l'équation (11) montre la grande importance de la vulnérabilité humaine qui représente 81,3% de la vulnérabilité globale ; la vulnérabilité environnementale représente 14,3%, alors que la vulnérabilité matérielle n'atteint que 4,4%.

$$V_{\text{globale}} = 0.8134 \times V_{\text{humaine}} + 0.1428 \times V_{\text{enviro}} + 0.0438 \times V_{\text{matérielle}} \quad (11)$$

Les résultats de la MHM peuvent aussi être restitués pour les trois types de vulnérabilité en analysant le poids de chaque catégorie d'impact sur les cibles. Les fonctions (12), (13) et (14) montrent que pour chaque type de cibles l'impact sur l'intégrité est dominant (entre 73% et 58%). Pour la vulnérabilité environnementale et matérielle l'impact économique est largement plus important que le psychologique (respectivement 28% et 34% contre 10% et 6%), alors que pour la vulnérabilité humaine c'est l'impact psychologique qui domine (18% contre 8%).

$$V_{\text{humaine}} = 0.73108 \times I_{\text{intégrité}} + 0.186935 \times I_{\text{psychologique}} + 0.081985 \times I_{\text{économique}} \quad (12)$$

$$V_{\text{enviro}} = 0.609265 \times I_{\text{intégrité}} + 0.10709 \times I_{\text{psychologique}} + 0.283645 \times I_{\text{économique}} \quad (13)$$

$$V_{\text{matérielle}} = 0.58212 \times I_{\text{intégrité}} + 0.0695 \times I_{\text{psychologique}} + 0.34838 \times I_{\text{économique}} \quad (14)$$

Enfin, l'équation (15) montre un exemple de formulation d'une fonction de vulnérabilité pour un impact.

$$(V_{\text{humaine}})I_{\text{psycho}} = 0.56942352 \times H1 + 0.01203693 \times H2 + 0.01726024 \times H3 + 0.09079795 \times H4 + \quad (15)$$

$$+ 0.05044577 \times H5 + 0.14156889 \times H6 + 0.08030606 \times H7 + 0.03816065 \times H8$$

Chaque fonction de vulnérabilité a été calculée pour chacune des mailles afin de réaliser les cartographies.

4.2 Cartographie de l'indicateur synthétique de vulnérabilité

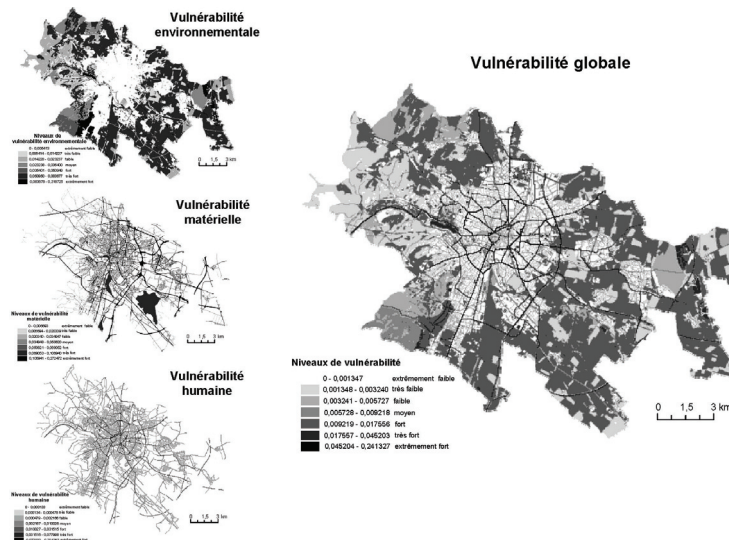


Figure 4 : Cartographie de la vulnérabilité globale à 19 h

La restitution des résultats prend la forme d'un ensemble de cartes : des cartes pour chaque type de vulnérabilité pouvant être réalisées à différents moments de la journée pour la vulnérabilité humaine et des cartes de vulnérabilité globale disponibles aussi aux différents moments de la journée. La figure 4 fournit un exemple des cartographies pouvant être obtenues.

5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La méthodologie appliquée prend en compte la composante humaine, environnementale et matérielle pour construire un indice global de vulnérabilité. Pour ce faire, trois catégories de cibles ont été quantifiées dans un SIG et pondérées à l'aide de la méthode hiérarchique multicritère pour obtenir des fonctions de vulnérabilité. L'implémentation de ces fonctions dans un SIG fournit un outil simple à manipuler, souple et permettant des interrogations analytiques. Par la suite, la méthodologie sera améliorée par l'intégration de jugements effectués par les experts. L'arborescence sera enrichie par des éléments décrivant la propension du territoire à aggraver un épisode de ruissellement (pentes, coefficients de ruissellement...), et l'efficacité des moyens de secours (accessibilité etc.). Il serait aussi intéressant de prendre en compte la culture du risque et la perception qu'en ont les populations locales. Enfin, les modalités de normalisation utilisées lors de la quantification des cibles devront être révisées. En effet, la fonction de normalisation appliquée accroît les valeurs de vulnérabilité des objets surfaciques et écrase celles concernant la population (les vulnérabilités environnementale et matérielle apparaissent comme plus importantes que la vulnérabilité humaine). En conclusion, même si plusieurs améliorations devront être apportées à la méthode, son intérêt réside dans sa souplesse et son caractère évolutif.

BIBLIOGRAPHIE

- Chardon A. C. (1994). Etude intégrée de la vulnérabilité de la ville de Manille (Colombie) aux risques naturels. In : *Revue de Géographie Alpine*, t. LXXXII n°4, 97-111.
- D'Ercole R. (1994). Vulnérabilité des sociétés et des espaces urbanisés : concepts, typologie, modes d'analyse. *Revue de Géographie Alpine*, t. LXXXII n°4, 87-96.
- Graillot D., Londiche H., Dechomets R., Batton-Hubert M., (2001), Analyse multicritère spatiale pour l'identification de la vulnérabilité aux inondations, In : *Actes du colloques SIRNAT 2001*, 6-7 décembre 2001, Sophia Antipolis.
- Griot C., Sauvagnargues-Lesage S., Dusserre G. Pearson D., Picheral H. (2002) Vulnérabilité face aux risques liés au transport de matières dangereuses : Apports de deux méthodes multicritères d'aide à la décision, In : *Déchets, Sciences et Technique* n° 27, 35-46.
- Hubert G., Ledoux B. (1999). *Le coût du risqué... L'évaluation des impacts socio-économiques des inondations*. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et des Chaussées, Paris.
- Propeck-Zimmermann E., (2003). L'inscription des risques dans l'espace: difficultés d'appréhension et de représentation. L'exemple des risques industriels. In : *Les risques*, V. Moriniaux (dir.), Ed. du Temps, Paris, 157-172.
- Saaty T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, New York
- Tixier J., Dandrieux A., Dusserre G., Bubbico R., Mazzarotta P., Silvetti B., Hubert E., Rodrigues N., Salvi O. (2006), Environmental vulnerability assessment in the vicinity of an industrial site in the frame of ARAMIS European Project. In: *Journal of Hazardous Materials*, n°130, 251-264.