

Evaluer la vulnérabilité des espaces urbains face au ruissellement pluvial

Aleksandra BARCZAK*

Résumé

La gestion du risque s'appuie sur un diagnostic précis de l'aléa et de la vulnérabilité qui permet une connaissance globale du risque. Cette proposition a pour objectif de contribuer au développement de méthodes d'analyse de la vulnérabilité des territoires urbains face au risque de ruissellement pluvial et de créer un outil d'aide à la décision flexible et facile à mettre en œuvre.

La méthodologie, appliquée à l'agglomération dijonnaise, consiste dans un premier temps à identifier et à quantifier les enjeux exposés au risque qu'ils soient humains, environnementaux ou matériels. Cette étape passe par la structuration et le traitement d'une base de données spatiale dédiée à l'étude de la vulnérabilité des espaces urbains face au ruissellement. Cette base de données intégrera diverses informations concernant les enjeux, mais aussi les caractéristiques du territoire susceptibles d'aggraver un épisode pluvial (la pente, les conditions de circulation de l'eau dans le réseau d'assainissement etc.). Dans un second temps une méthode d'analyse multicritère permettra d'évaluer l'importance de différents facteurs de vulnérabilité dans la vulnérabilité globale du territoire. Pour ce faire nous aurons recours à la méthode hiérarchique multicritère (MHM) mis en place par Satty (1980) qui consiste à structurer le problème dans une hiérarchie et utilise les jugements d'experts pour pondérer les différents facteurs de vulnérabilité. Cette méthode couplée à un système d'information géographique offre la possibilité de restituer différentes cartographies : de la vulnérabilité globale ou pour chacun des types d'enjeu (humains, environnementaux, matériels).

Mots clés : Ruissellement urbain, vulnérabilité, systèmes d'information géographiques, analyse multicritère

Introduction – Etudier la vulnérabilité du territoire pour l'analyse du risque de ruissellement urbain

La ville contemporaine est un lieu de concentration des risques majeurs naturels et technologiques (Dubois-Maury et Chaline 2002). Parmi eux, 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 se caractérise par une forte composante anthropique. Elle se traduit dans un premier temps par l'amplification du phénomène destructeur. En effet, l'étalement et la densification des tissus urbains amplifient l'« aléa ¹ » en contribuant à l'artificialisation des surfaces et du proche sous-sol qui ont une importance incontestable pour la formation du ruissellement et rendent les événements pluvieux redoutables (Scarwell et Laganier 2004). Dans un second temps, la pression exercée par l'urbanisation contribue à accroître les vulnérabilités des territoires et des populations qui les occupent. L'importance de la composante anthropique de ruissellement pluvial fait, que ce risque concerne non seulement les régions où les caractéristiques hydro-climatiques favorisent ce type de réponse hydrologique (méditerranéen), mais plus généralement les territoires affectés par une forte pression urbaine.

Pour répondre aux défis de la prévention et de la gestion des inondations urbaines, toute démarche repose sur une évaluation des composantes du risque. Pour autant que l'hydrologie urbaine dispose de

* Laboratoire THÉMA UMR 6049, Dijon

¹ La notion d'aléa est utilisée ici pour désigner le phénomène destructeur observé (Beck, 2006), même si dans le cas de ruissellement pluvial urbain les notions d'aléa et de vulnérabilité sont difficiles à distinguer. Ce phénomène étant en grande partie provoqué par l'homme, il n'est pas évident de le considérer comme aléatoire.

multiples outils basés sur la modélisation hydrologique afin d'étudier le comportement des bassins versant urbains face aux inondations rapides, les études du risque inondation se réduisent trop souvent à l'étude de l'aléa. Dans le domaine de l'évaluation de leurs conséquences les concepts et les méthodes restent encore peu formalisés. Dans le cadre des études de risque préalables aux Plans de Prévention des Risques (PPR par la suite) l'appréciation de la vulnérabilité du territoire se limite souvent à une cartographie de l'occupation des sols, selon une typologie simplifiée des biens existants pendant que des méthodes plus complètes d'analyse de la vulnérabilité restent mal valorisées et peu utilisées dans le processus d'aide à la décision (Ledoux 2006). Bruno Ledoux (2006) attribue ce manque d'intérêt pour l'analyse de la vulnérabilité au fait que la prévention des inondations en France consiste en réponses à des catastrophes et non pas en un diagnostic complet du risque.

C'est dans ce contexte que cette communication propose tout d'abord de présenter des approches conceptuelles de la vulnérabilité existantes. Ensuite elle exposera les différentes méthodes élaborées pour l'analyse de la vulnérabilité. Enfin, elle soumettra à la discussion une proposition de méthode d'analyse synthétique de la vulnérabilité qui permet d'appréhender la vulnérabilité dans son ensemble et de rendre compte de ses aspects plus qualitatifs.

De la connaissance des enjeux...

La connaissance des enjeux est incontournable dans la démarche d'évaluation du risque inondation. Elle constitue aussi une étape dans la définition d'une stratégie de réduction du risque en privilégiant les réponses non-structurelles de lutte contre les inondations (Scarwell et Laganier 2004, Ledoux 2006). La connaissance des enjeux est également un élément indispensable à la concertation lors de l'élaboration et de la comparaison des scénarii d'aménagement et de la rédaction des documents de planification pour les territoires affectés par les inondations (SCOT, PLU etc.). Le recensement des enjeux permet de connaître l'ampleur des dommages potentiels, mais aussi de hiérarchiser les priorités d'intervention et cela surtout dans les territoires qui n'ont pas été inondés depuis longtemps. Une appréciation des enjeux permet aussi d'équilibrer les moyens de prévention entre les territoires exposés au risque – souvent négligés du fait du manque d'une mémoire de la catastrophe, et les territoires récemment touchés par une catastrophe où se concentrent les mesures de réduction de risque. La connaissance des enjeux participe donc dans le choix de la stratégie de prévention. Il en est de même pour la planification de la gestion de la crise : le recensement des enjeux permet d'identifier et de localiser les populations vulnérables, les réseaux et les établissements à risque, les centres de secours etc. (Ledoux 2006).

Si l'objectif est d'évaluer le risque inondation dans une perspective de détermination d'une stratégie de prévention, de réduction de ce risque, le premier défi consiste à définir les enjeux. Le terme enjeu peut recouvrir toute implantation humaine dans la zone inondable. Il désigne donc les populations, les biens (les cultures et les animaux d'élevage) et les activités économiques présents dans la zone inondable. Cette notion sous-tend l'idée du dommage potentiel c'est-à-dire tout ce qui peut subir des dommages qui porteraient préjudice à l'économie locale, ou nationale. Le plus souvent cette acceptation exclut les enjeux environnementaux. Une définition plus large d'enjeu est néanmoins possible puisqu'elle peut être étendue au potentiel de développement des zones inondables dans l'optique des documents d'urbanisme, des volontés politiques ou de stratégies économiques. On parlera à ce moment des « enjeux de développement ». L'inscription des enjeux de développement dans l'étude, participe à la construction d'une politique de gestion du risque pérenne intégrant la connaissance du territoire en devenir (Ledoux, 2006).

L'étude des enjeux consiste donc à les recenser, à les décrire et les localiser selon des typologies plus ou moins précises et elle peut aller jusqu'à évaluer leur valeur (MEDD, 2003). Les objectifs d'évaluation des enjeux que nous avons détaillés ci-dessus ont été à l'origine d'un éventail de méthodes développées à cet effet dont le degré de précision, le coût et la lourdeur varient largement. Ces démarches peuvent prendre la forme d'une simple analyse de l'occupation des sols. Elles peuvent aussi être plus complètes et passer par le recensement des populations exposées, l'inventaire et l'analyse des enjeux économiques ou encore par l'estimation des dommages potentiels pour chaque type d'enjeu à partir de fonctions d'endommagement (Ledoux 2006, d'Ercole 1994).

Plusieurs difficultés méthodologiques se dressent lorsqu'on entreprend une démarche d'étude des enjeux. Ce sont tout d'abord les difficultés liées à la disponibilité des données nécessaires pour réaliser

un inventaire complet. L'étude des enjeux nécessite l'acquisition de bases de données couteuses ou leur mise en place est laborieuse. Une mise en cohérence des informations hétérogènes constitue elle aussi une étape délicate de la démarche. Une difficulté particulière apparaît lors de l'estimation de la population exposée. Si l'on souhaite estimer la population résidant dans la zone d'étude à partir du recensement de population il est difficile d'affecter les habitants à des bâtiments concrets. De surcroît, l'estimation de la population résidente apparaît insuffisante et il est nécessaire de tenir compte des populations au lieu de travail et dans les établissements recevant du public qui sont plus difficilement quantifiables. Enfin la mobilité journalière de ces différents groupes de population doit être prise en compte (Barczak et Grivault 2006). Concernant le recensement et l'analyse des enjeux économiques, la première difficulté est liée à la typologie de ces enjeux qui peut varier selon les objectifs de l'étude mais aussi selon les moyens et les données disponibles.

Deux approches différentes s'imposent pour l'estimation des enjeux économiques. La première dite zonale consiste à réaliser une cartographie du territoire en fonction de l'occupation des sols et à attribuer à chaque zone homogène une densité moyenne de biens. La deuxième approche - par entité de bien, se traduit par un recensement précis de tous les enjeux présents sur le territoire (Ledoux, 2006).

Deux éléments peuvent venir compléter la connaissance des enjeux exposés. D'un côté une étude historique retraçant l'histoire de l'urbanisation et de l'implantation humaine, et de l'autre, une étude prospective permettant de simuler l'évolution des enjeux selon les différents scénarii de prévention et d'aménagement (Ledoux, 2006).

Bien que l'analyse et l'étude des enjeux soit une étape nécessaire dans l'évaluation du risque, elle se limite à un recensement des éléments vulnérable et ne dit en rien leur fragilité face à une catastrophe. De surcroît, nous pouvons d'après Camille Grivault (2007) porter une critique de l'analyse des enjeux en tant que procédure entachée d'un fort degré de relativité puisqu'elle fait référence à des échelles de valeur, des échelles spatiales et temporelles différentes.

A l'évaluation de la vulnérabilité

La vulnérabilité est une composante du risque qui évolue dans le temps beaucoup plus rapidement que l'aléa, c'est donc elle qui en grande partie fait varier l'ampleur du risque. Selon l'échelle à laquelle nous nous intéressons à la description de la vulnérabilité, celle-ci peut être plus ou moins liée à l'aléa en jeu. Lorsqu'on cherche à décrire une société ou un vaste territoire d'un point de vue de sa vulnérabilité les raisons pour lesquelles une unité sera vulnérable seront les mêmes quel que soit l'aléa en jeu. Il s'agirait donc d'identifier les éléments vulnérables et les facteurs d'explication de la vulnérabilité seront généraux : capacité de reconstruction, organisation des secours etc. Si, au contraire on s'intéresse à évaluer à l'échelle fine le niveau de vulnérabilité des éléments exposés, leur vulnérabilité sera différente selon le type et l'ampleur de l'aléa (Ledoux 2006).

Malgré son importance dans la politique de réduction du risque, le concept de vulnérabilité reste flou. Une acceptation consensuelle reste difficile à désigner dans la multitude de définitions existantes aussi bien dans le monde des gestionnaires du risque que dans le monde de la recherche. Le glossaire comparatif publié récemment par l'ONU (Thywissen 2006) donne une image de la confusion qui accompagne tout effort de synthétiser la notion de vulnérabilité.

Une définition reconnue par des instances internationales considère la vulnérabilité comme le degré de pertes résultant d'un phénomène susceptible d'engendrer des victimes et des dommages matériels (Ledoux 2006). La vulnérabilité entendue de cette façon devrait être définie pour les différents niveaux de sévérité de l'aléa selon lesquels varie le niveau de dommages. Cette définition peut être considérée comme réductrice puisqu'elle exclut d'éventuels éléments de compréhension de l'origine de la fragilité des enjeux face à un événement, essentiels pour la réduction de cette vulnérabilité.

En France, le concept de vulnérabilité a été introduit au début des années 80 à l'occasion de l'élaboration d'outil réglementaire PER et défini comme le degré d'endommagement que subissent les enjeux exposés sous l'effet d'un phénomène d'intensité donnée. La mesure d'endommagement retenue était le coût de cet endommagement. Cette approche de la vulnérabilité a été progressivement abandonnée au cours des années 80 à cause de la lourdeur de la démarche qui aboutissait à des résultats peu opérationnels (Ledoux 2006).

Par la suite l'étude de la vulnérabilité a été plus ou moins délaissée en raison du manque d'un cadre conceptuel admis et d'une méthodologie reconnue et fonctionnelle. Pour illustrer cela nous pouvons citer certains documents méthodologiques de l'Etat où le concept de vulnérabilité n'apparaît pas et où il a été substitué par celui des « conséquences des inondations » (MATE, METL 1999). Cette situation a évolué depuis dans un contexte d'accentuation de la nécessité de la réduction de la vulnérabilité comme une composante essentielle de la politique de réduction des risques naturels. Néanmoins, même si l'importance de la vulnérabilité est de plus en plus soulignée par les services en charge de l'élaboration des documents de gestion des risques, ses définitions par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (par la suite MEDD) fluctuent de « degré de perte ou d'endommagement des biens et des activités exposés à l'occurrence d'un phénomène naturel d'une intensité donnée » (MATE, METL 1997) par « niveau de conséquences prévisibles de l'aléa sur les enjeux » (MEDD 2004), à « la résistance plus ou moins grande du bien ou de la personne à l'événement » (MEDD 2005) ou encore à « la propension d'une personne, d'un bien, d'une activité, d'un territoire à subir des dommages suite à une catastrophe naturelle d'intensité donnée » (MEDD 2003). Nous constatons donc le manque d'une définition faisant l'unanimité, mais si les documents ministériels ne définissent la vulnérabilité que de manière fluctuante c'est aussi parce que la recherche n'offre pas de cadre conceptuel de référence.

Selon Ledoux (2006) deux groupes d'approches de la vulnérabilité s'imposent. Le premier comprend la vulnérabilité comme une quantification des enjeux, le deuxième comme une différenciation de l'espace en fonction de sa tolérance à l'aléa.

Ce premier groupe d'approche correspond à une acceptation particulière de la vulnérabilité selon laquelle cette dernière est comprise comme l'importance des enjeux exposés. Cette acceptation de la vulnérabilité qui fait souvent l'amalgame entre « vulnérabilité » et « enjeux » rend la vulnérabilité étroitement liée au type d'occupation des sols. Certaines approches qui lui sont associées s'efforcent souvent à caractériser les différents types d'occupation des sols en fonction de leur endommagement potentiel vis-à-vis de l'aléa considéré (Thouret et d'Ercole 1996). Les approches de ce type peuvent aussi aboutir à une hiérarchisation des enjeux au regard de la gravité de dommages prévisibles et à l'élaboration d'une « échelle de vulnérabilité ». Cette acceptation garde le mérite de sa simplicité, mais le plus souvent elle occulte la complexité de la réalité et repose sur des notions rarement explicites telles « la gravité », « la tolérance aux inondations » etc. (Ledoux 2006).

Il est aussi fréquent de voir la notion de vulnérabilité comprise comme synonyme de l'évaluation monétaire des dommages. Deux critiques peuvent être portées à cette approche. Premièrement, elle correspond plutôt à une évaluation du risque que de la vulnérabilité (les dommages exprimés en valeur monétaire sont provoqués aux enjeux par un aléa d'une intensité donnée). Deuxièmement, cette approche privilégie l'évaluation des pertes économiques directes et néglige souvent les dommages intangibles et indirects. En plus la valeur monétaire des dommages est difficile à interpréter puisque certains dommages dont le coût n'est pas élevé peuvent rendre impossible le fonctionnement de petites structures et au contraire les dommages à coût élevé peuvent être facilement surmontables pour des grandes structures (Ledoux 2006).

Dans ce même groupe d'approche se place une démarche bien plus ambitieuse, celle développée par le CEMAGREF dans le cadre de travaux sur la méthode « Inondabilité ». Nous nous attarderons plus sur cette méthode dans le chapitre prochain en nous limitant ici à présenter le cadre conceptuel mobilisé. Pour les auteurs de la méthode « la vulnérabilité reflète le fait qu'une parcelle de terrain subit des dommages si elle est inondée ». Cette approche s'efforce à intégrer le niveau de probabilité d'endommagement dans le concept de la vulnérabilité et son originalité réside dans la volonté d'exprimer la vulnérabilité avec la même unité de mesure que l'aléa (Roussel, 1998).

Le deuxième groupe d'approches plutôt que de se concentrer uniquement sur l'importance des enjeux, s'efforce à différencier l'espace en fonction de sa propension à subir les dommages. Nous parlerons ici de deux approches principales : celle par l'endommagement potentiel et celle par l'analyse systémique de la vulnérabilité (Thouret, D'Ercole 1996).

L'approche de la vulnérabilité par endommagement potentiel qui peut être considérée comme classique, est focalisée sur la mesure des conséquences potentielles d'un phénomène destructeur. Son but est d'estimer les coûts directs immédiats et lents ainsi que les coûts indirects d'une catastrophe

potentielle. Dans ce bilan de dommages, les pertes liées aux préjudices corporels, habitat, activité socioéconomique, ainsi qu'aux moyens de production, emploi, reconstruction sont mesurés. Les atteintes au patrimoine humain, écologique, culturel, esthétique et la réadaptation sont aussi de grande importance mais leur estimation reste bien plus difficile. Le rapport entre les dommages et la réponse constituée par la mise en place d'une politique de prévention permet d'évaluer le « risque acceptable » en prenant en compte le coût réel de tous les éléments. Deux critiques sont portées à cette approche (D'Ercole 1998). La première met l'accent sur l'impossibilité de mesurer toutes les conséquences potentielles et les incertitudes liées aux caractéristiques de l'aléa et aux modes d'endommagement. La deuxième souligne que les causes de la vulnérabilité ne sont pas prises en compte.

A partir du début des années 90, un nouveau cadre conceptuel de la vulnérabilité – dans lequel s'inscrit cette communication - a été proposé par Jean-Claude Throuet et Robert d'Ercole. Ces auteurs conçoivent la vulnérabilité comme un système composé d'éléments vulnérables et de facteurs (Throuet et d'Ercole 1995). Plus précisément, selon eux « la vulnérabilité s'inscrit dans un système qui englobe les préjudices corporels et moraux aux personnes et l'endommagement potentiel des éléments exposés (biens de production, activités socio-économiques et patrimoine). Ce système obéit à une série de facteurs structurels, géographiques et conjoncturels » (Throuet et d'Ercole 1996).

Etat de l'art – Les méthodes mises en œuvre pour étudier la vulnérabilité face aux risques hydrologiques

Les méthodes élaborées pour étudier la vulnérabilité peuvent être classées en trois types de démarche : quantitative, qualitative et semi-quantitative. La démarche quantitative s'appuie sur l'analyse des éléments vulnérables et mesure les conséquences d'un phénomène destructeur. La vulnérabilité est exprimée ici comme pourcentage de ce qui peut être perdu en cas de catastrophe (indice de perte, indice de vulnérabilité) (d'Ercole 1995). Cette démarche peut prendre forme d'une évaluation *a posteriori* : basée sur des estimations de pertes lors des événements catastrophiques historiques, ou bien d'une évaluation *a priori* : fondée sur des estimations de dommages potentiels compte tenu de l'intensité de l'aléa (Hubert et Ledoux 1999). Deux critiques peuvent être portées à ce type de démarche. Tout d'abord elles sont entachées d'une forte incertitude concernant les modes estimation des dommages intangibles et indirects. Ensuite, ce type d'approche se limite à estimer le niveau de phénomène qui déterminerait les dommages et ne rend pas compte des conditions qui font varier le niveau de conséquences ni la fragilité intrinsèque des éléments exposés (Grivault 2007). La démarche qualitative est fondée sur l'analyse des facteurs structurels, conjoncturels et géographiques de vulnérabilité qui induisent une certaine réponse de la société face à la catastrophe. La vulnérabilité correspond ici à la propension d'une société à subir des dommages qui varie en fonction de multiples facteurs (Throuet et d'Ercole 1996). La troisième démarche – semi-quantitative, insiste sur une analyse simultanée des facteurs de vulnérabilité et des éléments vulnérables. Elle aboutit à une hiérarchisation sociale et/ou spatiale des éléments exposés (Ledoux 2006). Allant du recensement des enjeux, par la définition des facteurs de vulnérabilité elle permet d'établir un zonage, c'est-à-dire de produire une représentation cartographique de la vulnérabilité globale du territoire. Ce type de démarche peut mobiliser différents dispositifs méthodologique telle l'analyse factorielle ou l'analyse multicritère (Propeck-Zimmermann 2003).

Dans ce chapitre nous nous efforcerons à présenter les deux méthodes les plus reconnues et de présenter les apports de la méthode retenue pour la réalisation de cette étude : l'analyse multicritère de la vulnérabilité. Ces trois exemples s'inscrivent respectivement dans les trois types de démarche présentés ci-dessus.

La méthode « Inondabilité »

La méthode « Inondabilité » est une méthode d'évaluation du risque inondation conçue pour fournir une aide à la décision dans le domaine de l'aménagement du territoire dans une optique de prévention. Son objectif est d'évaluer le risque en menant deux démarches simultanées : celle de la spatialisation de l'aléa attribuant à chaque unité spatiale les différentes caractéristiques de la crue ramenées à une variable

unique : la période de retour minimale d'une crue inondante ; et celle de quantification et de spatialisation de la vulnérabilité à partir des mêmes paramètres que pour l'aléa.

L'analyse de vulnérabilité telle que définie dans le cadre de la méthode « Inondabilité » rend compte de la diversité de l'occupation des sols et intègre une hiérarchisation des types d'occupation des sols traduisant la vulnérabilité exprimée au niveau de chaque unité spatiale (à savoir – la parcelle). Cette quantification de la vulnérabilité ne se réduit pas à une analyse de coût de dégâts. Au contraire, les auteurs ont cherché à intégrer des paramètres sociologiques complexes comme la valeur affective associée au foncier, variabilité de la notion de vulnérabilité d'un individu à l'autre. Pour cela, les « objectifs de protections » (ou le risque maximal acceptable) sont déterminés à partir d'une enquête locale permettant d'intégrer les spécificités locales de perception du risque à partir d'un processus de concertation. Le CEMAGREF propose donc d'intégrer dans l'étude de la vulnérabilité l'expression des besoins de protection individuels à partir de mêmes variables que celles utilisées pour décrire l'aléa : la période de retour de la crue, la durée de submersion maximale, la profondeur maximale. Ces trois variables sont ensuite transformées par équivalence hydrologique en une variable unique qui correspond à la période de retour équivalente à « l'objectif de protection » retenu. Cette mesure de la vulnérabilité permet ensuite de produire la cartographie de la vulnérabilité pour l'ensemble du territoire (Gendreau 1999, Roussel, 1998, Ledoux 2006).

La première critique adressée à la méthode « Inondabilité » consiste à s'interroger sur la faisabilité d'une enquête portant sur les « objectifs de protection » à l'échelle parcellaire. En réponse, le CEMAGREF a élaboré une série de normes-guides qui permettent d'éviter une enquête locale et de travailler sur la base de grands ensembles homogènes. Néanmoins, cette solution réduit l'analyse de vulnérabilité à une analyse d'occupation des sols plus ambitieuse et dégrade l'originalité de la méthode en termes de prise en compte de la perception du risque et de concertation. Trois autres limites sont soulignées par les auteurs de la méthode eux-mêmes. Premièrement, un volet économique manque. Deuxièmement, la notion de période de retour, de probabilité est difficile à introduire dans une démarche de concertation. Enfin, la méthode aboutit à un jeu de négociation sur les transferts de volumes d'eau d'un secteur à un autre en fonction des objectifs de protection (sur-inonder une zone pour en protéger une autre), mais une réflexion sur les mesures compensatoires manque (Gendreau 1999).

Analyse systémique de la vulnérabilité

Dans le cadre de la réflexion sur le concept de la vulnérabilité que nous avons présenté dans le chapitre précédent, Jean-Claude Throuet et Robert d'Ercole (1996) proposent une méthode d'évaluation de la vulnérabilité à travers une analyse systémique. Cette approche à l'ambition de rendre compte des facteurs de vulnérabilité d'une société. Elle analyse tout d'abord les facteurs structurels, conjoncturels et géographiques et examine ensuite les types de réponses sociales que ces facteurs induisent. Les auteurs distinguent quatre catégories de facteurs structurels :

- Facteurs sociodémographiques et économiques,
- Facteurs socioculturels,
- Facteurs physiques, techniques et fonctionnels,
- Facteurs institutionnels et politico-administratifs.

A ces facteurs structurels s'ajoutent les facteurs géographiques traduisant les caractéristiques de l'aléa, ainsi que les facteurs conjoncturels qui accentuent les facteurs géographiques et modifient certains facteurs structurels. Il s'agit de dysfonctionnements urbains, techniques ou institutionnels. Ces deux derniers groupes de facteurs se distinguent par leur caractère momentané, contingent, difficile à prévoir.

Une analyse des facteurs de vulnérabilité est suivie d'une analyse des réponses sociales c'est-à-dire des comportements humains, qui à leur tour viennent refléter le rôle des facteurs et induire les effets de la catastrophe. Les réponses à la crise varient dans le temps, dans l'espace, parmi les sociétés et en leur sein, en fonction des facteurs de vulnérabilité, mais aussi des seuils socioculturels qui renvoient à des attitudes face à la catastrophe. Les réponses sociales tout en gardant un caractère évolutif, peuvent être réparties en quatre catégories :

Absorption passive de l'endommagement répété (absence de conscience de risque et/ou absence de préparation à la crise),

Acceptation de l'endommagement (prise de conscience du risque acquis),

Réduction de l'endommagement (atténuation individuelle ou collective),

Modification radicale *a priori* du comportement social en cas de crise (le seuil de refus dépassé).

Cette méthode d'évaluation de la vulnérabilité relève de la stratégie globale de gestion du risque. En effet, chaque composante de la politique de gestion du risque : prévention, organisation de la crise, reconstruction, cherche à réduire un aspect différent de la vulnérabilité. Elle fournit un diagnostic approfondi qui permet d'atténuer la vulnérabilité de trois façons :

Réduction prévisionnelle – avant la crise

Réduction opérationnelle – pendant la crise

Réduction prévisionnelle et opérationnelle – après la crise (Throuet et d'Ercole 1996).

Cette méthode appartient à la famille des méthodes qualitatives. La vulnérabilité n'est donc pas « quantifiée », elle peut néanmoins être appréciée à travers des indicateurs associés à chaque type de facteur de vulnérabilité. Qui plus est, cette démarche systémique construite autour de l'idée de la complexité du concept de vulnérabilité se veut complémentaire par rapport à la démarche classique par endommagement potentiel, celle comptée parmi les méthodes quantitatives.

Une grande difficulté survient lors de l'étude de la vulnérabilité telle que la conçoivent Jean-Claude Throuet et Robert d'Ercole, celle de la lourdeur du diagnostic pluridisciplinaire et de la connaissance des catastrophes historiques.

Une autre méthode peut être exposée comme exemple de mobilisation de l'analyse systémique pour l'évaluation de la vulnérabilité : celle proposée par Danienne Provitolo (2001). L'auteur cherche à étudier la complexité de la catastrophe urbaine à l'aide de la modélisation en dynamique de système. Cette méthode permet d'élaborer un modèle de stocks et de flux associant l'aléa et la vulnérabilité synthétique pour simuler la dynamique d'une inondation. Pour étudier la vulnérabilité l'auteur se réfère en même temps à l'approche par endommagement potentiel des personnes et à celle par capacité de réponse à une crise. Le diagramme stock-flux du module vulnérabilité est connecté à celui de l'aléa ce qui permet d'étudier la vulnérabilité en fonction de l'ampleur de la crue. En plus de varier la vulnérabilité en fonction de l'intensité de l'évènement, cette approche relie les éléments exposés (les personnes) avec les facteurs agissant sur la vulnérabilité des individus et par cela s'inscrit dans une approche semi-qualitative de la vulnérabilité (Provitolo 2001). Deux critiques peuvent cependant être portées à cette méthode. D'abord elle ne s'intéresse qu'à la vulnérabilité des personnes, or l'importance des enjeux matériels et environnementaux peut difficilement être négligée dans une analyse complète de la vulnérabilité. Ensuite, la méthode permet d'apprécier le déroulement de la crise, mais la spatialisation des composantes du risque n'a pas été entreprise.

La place des méthodes multicritères

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 où plusieurs critères qualitatifs et quantitatifs entrent en jeu. Ces critères sont le plus souvent conflictuels, hétérogènes (ils se mesurent sur différentes échelles), et ont une importance inégale dans la solution du problème.

Si nous définissons la vulnérabilité d'après d'Ercole (1994) comme un système hétérogène où interviennent et interfèrent de nombreux facteurs physiques, socio-économiques, psychosociologiques, fonctionnels et techniques etc., son évaluation ne peut pas se réduire à l'évaluation d'un seul critère comme par exemple le coût de dommages. Au contraire, elle devrait être appréhendée dans une perspective multidimensionnelle. L'évaluation de la vulnérabilité est un problème complexe par la multiplicité des paramètres qui peuvent caractériser les enjeux, ainsi que par l'incertitude associée au rôle et au poids des facteurs quantitatifs (nombre de vies humaines en jeu, valeur des biens etc.) et qualitatifs (type du bâti, perception du risque, organisation des secours etc.), qui par ailleurs se mesurent sur des échelles différentes (Propeck-Zimmermann 2003). Une inondation étant un problème de nature

territoriale et susceptible de toucher directement la population, sa gestion fait intervenir un grand nombre d'acteurs aux objectifs d'actions et aux intérêts souvent opposés. Enfin les différents enjeux exposés ont une importance inégale face à la catastrophe, les pertes de vies humaines ne pouvant être comparées à des pertes matérielles. Les éléments exposés ici font de l'évaluation de la vulnérabilité un objet adapté à l'approche multicritère (Grivault 2007).

Par ailleurs, 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 (Grillot *et al.* 2000). Bruno Barroca *et al.*, (2005) proposent d'évaluer la vulnérabilité aux inondations du bassin de l'Orge aval à travers des grilles de lecture multicritère construites afin d'élaborer des indicateurs de vulnérabilité. Les auteurs retiennent cinq facteurs de vulnérabilité : l'exposition à l'aléa, la vulnérabilité de la population, la vulnérabilité du bâti, celle liée aux usages et enfin la vulnérabilité liée à la gestion de crise. Cette étude réalisée à grande échelle (bâtiments) sur trois sites tests reste néanmoins difficile à généraliser sur un territoire plus vaste.

Les MHM ont également trouvé une application dans le domaine de l'évaluation de la vulnérabilité face aux autres risques majeurs tels que les risques industriels (Tixier *et al.* 2006) ou encore les risques de transport de matières dangereuses (Griot *et al.* 2001, Batton-Hubert *et al.* 2006, Grivault et Barczak 2007)

En nous inspirant largement de ces expériences nous proposons d'utiliser la MHM couplées à l'analyse spatiale pour obtenir une évaluation semi-quantitative de la vulnérabilité d'une agglomération urbaine (à savoir, l'agglomération dijonnaise) au risque de ruissellement à l'aide d'un système d'information géographique. Cette analyse cherche à produire un indicateur global de vulnérabilité. Elle permettra aussi d'aboutir à une cartographie synthétique et analytique de la vulnérabilité.

La méthodologie proposée

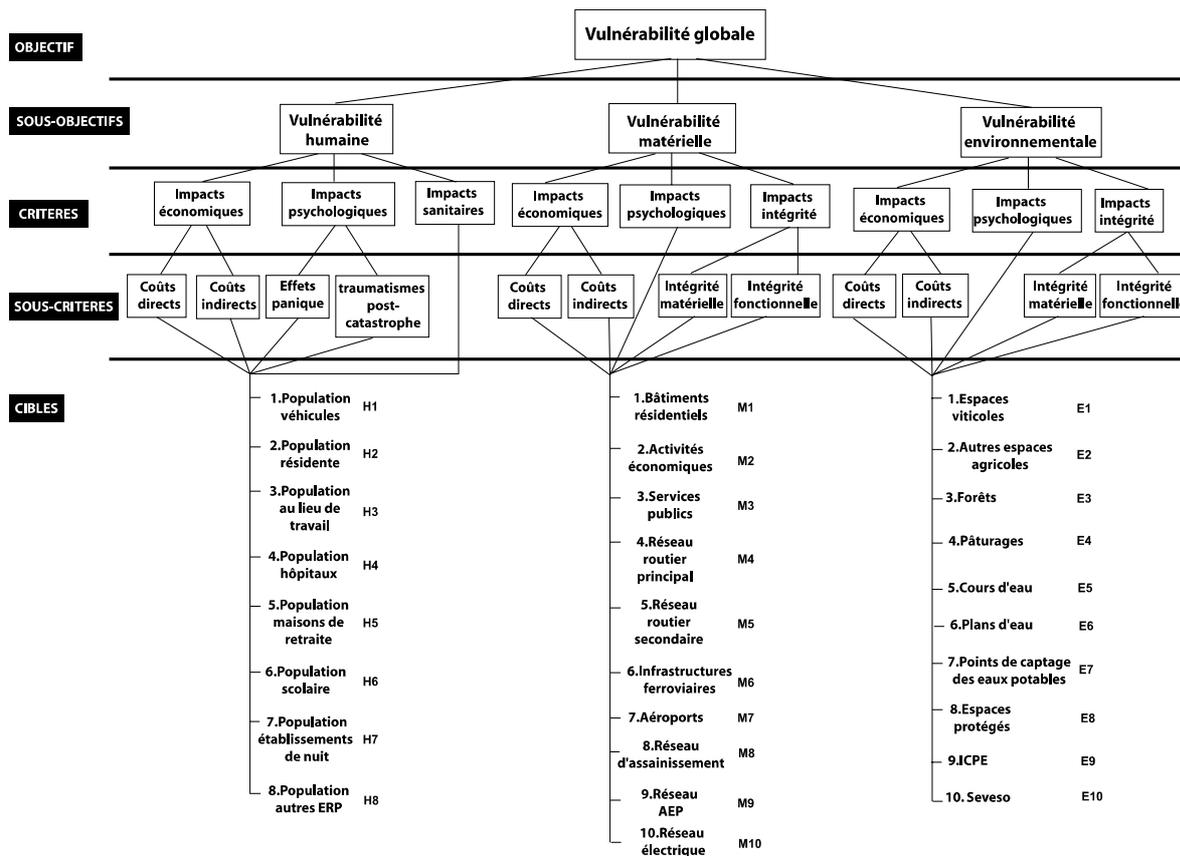
La méthode retenue est l'analyse multicritère hiérarchique mise au point par T. Saaty (Saaty 1980). Cette méthode présente l'intérêt de proposer un modèle facilement compréhensible d'organisation des données. En effet, elle reflète la tendance naturelle de l'esprit à trier les éléments d'un système en différents niveaux et à regrouper les éléments semblables sur un même niveau afin de résoudre des problèmes non structurés. La méthode retenue se caractérise par sa souplesse permettant d'établir des priorités et de les restituer aux différents niveaux de la hiérarchie. Elle autorise également 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.

La mise en place d'une analyse globale de la vulnérabilité exige l'intégration de nombreuses informations concernant les enjeux humains, matériels, environnementaux. 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. 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. 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).

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 termes 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 proposée ici, 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 etc.). Enfin, les impacts psychologiques expriment les effets en termes 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 enjeux ou cibles humaines, matérielles et environnementales susceptibles d'être impactées.

La seconde étape de la méthode consiste à évaluer les priorités à partir du jugement d'experts. A cette étape de la réflexion les jugements ont été effectués à partir de nos connaissances des impacts des inondations en grande partie basées sur 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.

Quantification des enjeux

Afin de bien rendre compte de différents groupes de populations dont les caractéristiques déterminent leur vulnérabilité, ainsi que pour tenir compte des déplacements de ces populations, les enjeux ou cibles humaines ont fait l'objet d'un traitement particulier. La méthode proposée pour une « journée type » passe par quatre grandes étapes.

Dans une première étape la population a été répartie dans les bâtiments selon les fonctions des bâtiments et les types de population. 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 :

$$P_e = (S_b \div S_p) \times E_p \quad (2)$$

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

Dans une seconde étape nous nous sommes efforcés à simuler la mobilité de différents groupes de population dans la zone d'étude pendant la journée. Une enquête réalisée sur un échantillon de 500 activités a été une source d'information sur les horaires d'ouverture et de fermeture des activités économiques de l'agglomération. 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 (domicile, travail, loisirs etc.) 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 (fig. 2).

Figure 2 : Quantification des cibles humaines

Quantification de la cible H₁ - population dans des véhicules	
$H_1 = T/T_{max}$	où
	T - trafic du tronçon routier traversant la maille
	T _{max} - trafic maximum observé sur un tronçon routier de la zone d'étude
Quantification des autres cibles humaines (H₂ - H₇)	
$H = N/N_{max}$	où
	N - nombre de personnes présentes dans la maille
	T _{max} - nombre maximum de personnes présentes dans une maille de la zone d'étude

Pour quantifier les cibles environnementales présentes dans la zone d'étude nous avons appliqué les formules résumées par la figure 3.

Figure 3 : Quantification des cibles environnementales

Quantification des cibles M₄, M₅, M₆, M₇ - réseau urbains (1)	
$M = S/S_{max}$	où
	S - surface de la cible présente dans la maille
	S _{max} - surface maximale de la cible dans une maille de la zone d'étude
Quantification des cibles M₈, M₉, M₁₀ - réseau urbains (2)	
$M = L/L_{max}$	où
	L - longueur de la cible présente dans la maille
	L _{max} - longueur maximale de la cible dans une maille de la zone d'étude
Quantification des cibles M₂, M₃ - enjeux économiques et services publics	
$M = E/E_{max}$	où
	E - nombre d'emplois présents dans la maille
	E _{max} - nombre maximum d'emplois présents dans une maille de la zone d'étude
Quantification de la cible M₁ - bâtiments résidentiels	
$M = Lo/Lo_{max}$	où
	Lo - nombre de logements présents dans la maille
	L _{max} - nombre maximum de logements présents dans une maille de la zone d'étude

Les facteurs de quantification des cibles matérielles sont restitués dans la figure 4.

Figure 4 : Quantification des cibles matérielles

Quantification de la cible E₇ - points de captage	
$E_7 = P/P_{max}$	où
	P - prélèvements du point de captage présent dans la maille
	P _{max} - prélèvements maximum observé pour un point de captage
Quantification des autres cibles environnementales (E₁ - E₆ et E₈ - E₁₀)	
$E = S/S_{max}$	où
	S - surface de la cible présente dans la maille
	S _{max} - surface maximale de la cible dans une maille de la zone d'étude

Discussion

Les potentialités de la méthode proposée et l'exemple d'application

La méthode proposée a été testée sur le territoire de l'agglomération dijonnaise. Cette application a permis d'étudier deux types de résultats. Dans un premier temps, nous avons obtenu les résultats concernant l'importance de chaque composante de la vulnérabilité. 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 (3) 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%.

$$V_{\text{globale}} = 0.8134 \times V_{\text{humaine}} + 0.1428 \times V_{\text{enviro}} + 0.0438 \times V_{\text{matérielle}} \quad (3)$$

Dans un deuxième temps, 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%).

$$V_{\text{humaine}} = 0.73108 \times I_{\text{int égrité}} + 0.186935 \times I_{\text{psycho log ique}} + 0.081985 \times I_{\text{économique}} \quad (4)$$

$$V_{\text{enviro}} = 0.609265 \times I_{\text{int égrité}} + 0.10709 \times I_{\text{psycho log ique}} + 0.283645 \times I_{\text{économique}} \quad (5)$$

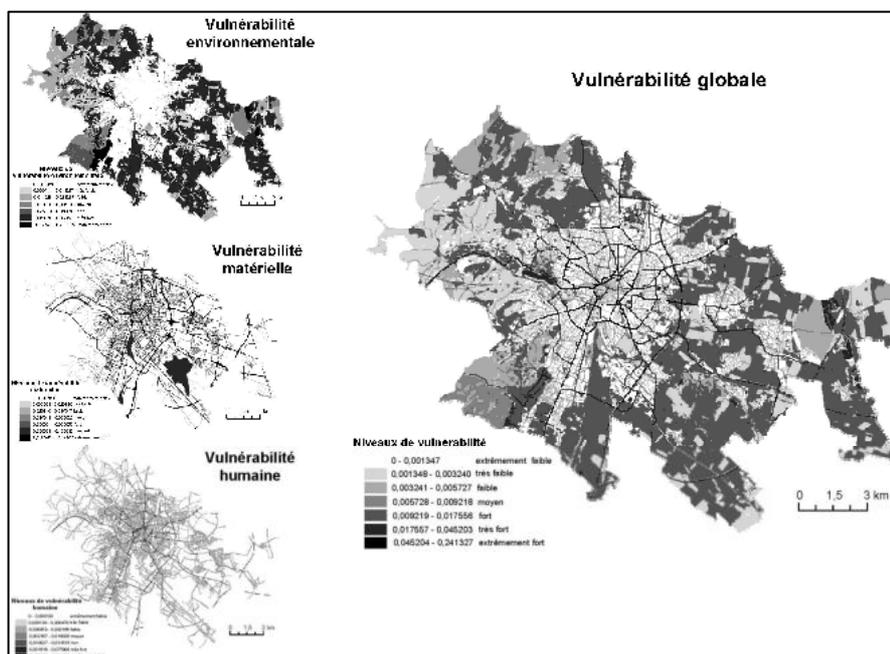
$$V_{\text{matérielle}} = 0.58212 \times I_{\text{int égrité}} + 0.0695 \times I_{\text{psycho log ique}} + 0.34838 \times I_{\text{économique}} \quad (6)$$

Enfin, l'équation (7) montre un exemple de formulation d'une fonction de vulnérabilité pour un impact.

$$(V_{\text{humaine}})_{\text{psycho}} = 0.56942352 \times H1 + 0.01203693 \times H2 + 0.01726024 \times H3 + 0.09079795 \times H4 + (7) \\ + 0.05044577 \times H5 + 0.14156889 \times H6 + 0.08030606 \times H7 + 0.03816065 \times H8$$

Dans un dernier temps, chaque fonction de vulnérabilité a été calculée pour chacune des mailles afin de réaliser les cartographies (fig. 5).

Figure 5 : 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 5 fournit un exemple des cartographies pouvant être obtenues.

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.

Les limites de la méthode et les améliorations à apporter

La première limite de la méthode repose dans les modalités de normalisation utilisées lors de la quantification des cibles. 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). Ces modalités seront révisées.

La deuxième limite concerne la structuration de la hiérarchie elle-même. Dans les études à venir, il nous paraît plus intéressant de construire la hiérarchie autour des facteurs de vulnérabilité que des impacts pour mettre au centre de l'analyse les causes plutôt que les conséquences d'un épisode de ruissellement. A côté des composantes humaine, environnementale et matérielle il faudrait intégrer la vulnérabilité fonctionnelle, (liée au niveau de dépendance, l'importance...), celle liée à l'organisation des secours (accessibilité des secours) et la sensibilité du territoire (pentes, cheminement de l'eau dans la ville, imperméabilité des surfaces...). Il serait aussi intéressant d'enrichir l'étude de la vulnérabilité humaine par l'intégration de la culture du risque et de la perception qu'en ont les populations locales.

Enfin, par la suite, la méthodologie sera améliorée par l'intégration de jugements effectués par les experts.

Conclusion

Cette communication nous a permis de suivre l'évolution du cadre conceptuel de l'évaluation des enjeux exposés aux inondations et de la vulnérabilité des populations et des territoires dans une optique d'analyse et de prévention des risques. Nous avons pu observer les difficultés à donner une définition consensuelle à la vulnérabilité, nous avons présenté différentes manières d'approcher ce concept par les questionnaires du risque et par les chercheurs et nous avons exposé plusieurs méthodes élaborées pour son étude. Cette recherche bibliographique nous a permis de situer la méthode que nous proposons pour évaluer la vulnérabilité des espaces urbains face au ruissellement pluvial parmi les méthodes et les concepts existants.

L'étude de vulnérabilité à l'aide de la méthode hiérarchique multicritère que nous proposons ici a pour ambition de procéder à un inventaire des enjeux le plus exhaustif possible, de tenir compte de différents aspects de la vulnérabilité (humaine, environnementale, matérielle) et rendre compte de l'importance de différents impacts du ruissellement sur les éléments exposés. Elle s'inscrit dans une démarche de concertation puisqu'elle est conçue de manière à intégrer les jugements d'experts et puisque les résultats cartographiques synthétiques et analytiques peuvent devenir un outil d'aide à la décision pour les acteurs impliqués dans la gestion du risque de ruissellement.

En conclusion, même si plusieurs améliorations sont à apporter à la méthode, son intérêt réside dans sa souplesse et son caractère évolutif.

Bibliographie

BARCZAK A., GRIVAULT C., (2006), « Système d'information géographique pour la gestion des risques urbains », in : V^{ème} Journée Jeune Recherche de Grand Est, Territoire(s) : Quels outils ? Quelles réflexions ? Quelles attentes, 9 juin 2006, Besançon.

BARROCA B., POTTIER N., LEFORT E., (2005), « Analyse et évaluation de la vulnérabilité aux inondations du bassin de l'Orge aval », in : VII^e Rencontres de Géographie Théorique et Quantitative ThéoQuant, Besançon.

BATTON-HUBERT M., DESPOUY T., VIE J., (2006), « En France : Analyse du risque lié au transport des matières dangereuses (TMD) à l'échelle départementale – application au transport routier sur le département de la Loire » in : GRAILLOT D., WAAUB J.-Ph. (dir.), Aide à la décision pour l'aménagement du territoire, Hermès - Lavoisier, Paris.

BECK E., (2006), « Approche multi-risque en milieu urbain. Le cas des risques sismique et technologiques dans l'agglomération de Mulhouse (Haut-Rhin) », Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg.

D'ERCOLE R., (1994), « Vulnérabilité des sociétés et des espaces urbanisés : concepts, typologie, modes d'analyse. », in : Revue de Géographie Alpine, t. LXXXII n°4, p. 87-96.

D'ERCOLE R. (1998), « Approches de la vulnérabilité et perspectives pour une meilleure logique de réduction des risques », in : Pangea, n°29/30, p. 20-28.

D'ERCOLE R., THOURET J.-C., (1995), « Croissance urbaine et risques naturels : présentation introductive (des conclusions du Colloque international « Croissance urbaine et risques naturels » Clermont-Ferrand, 2-3 décembre 1994) », in : Bulletin de l'Association des Géographes Français, n°4 95, p. 311-338.

D'ERCOLE R., THOURET J.-C., (1996), « Vulnérabilité aux risques naturels en milieu urbain : effets, facteurs et réponses sociales », in : Cahiers des Sciences Humaines, n°32 (2) 96, p. 407-422.

DUBOIS-MAURY J., CHALINE C., (2002), « Les risques urbains », Paris, Armand Colin.

GENDREAU N., (1999), « La méthode Inondabilité », in : HUBERT G., LEDOUX B., « Le coût du risque... L'évaluation des impacts socio-économiques des inondations », Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.

GRAILLOT D., LONDICHE H., DECHMETS R., BATTON-HUBERT M., (2001), « Analyse multicritère spatiale pour l'identification de la vulnérabilité aux inondations », in : Actes du colloques SIRNAT 2001, Sophia Antipolis, Nice.

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.

GRIVAULT, (2007), « Risques industriels : localisations et aménagements urbains », document de travail (thèse de doctorat en cours), Université de Bourgogne, Dijon.

GRIVAULT C., BARCZAK A., (2007), « Evaluer la vulnérabilité des territoires aux risques de transport de matières dangereuses : L'apport des méthodes multicritères », poster présenté au Colloque International de Géomatique et d'Analyse Spatiale SAGEO, Clermont-Ferrand

HUBERT G., LEDOUX B., (1999), « Le coût du risque... L'évaluation des impacts socio-économiques des inondations », Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.

LEDOUX B., (2006), « La gestion du risque inondation », Editions TEC&DOC Lavoisier, Paris.

MINISTERE DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE ET DE L'ENVIRONNEMENT [MATE], MINISTERE DE L'EQUIPEMENT, DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT [METL], (1997), « Plans de prévention des risques naturels prévisibles », guide général, La Documentation Française, Paris.

MINISTERE DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE ET DE L'ENVIRONNEMENT [MATE], MINISTERE DE L'EQUIPEMENT, DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT [METL], (1999), « Plans de prévention des risques naturels (PPR). Risque inondations », guide méthodologique, La Documentation Française, Paris.

MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE [MEDD], (2003), « Plans de prévention des risques naturels (PPR). Risque inondations (ruissellement péri-urbain) », note complémentaire, Direction de la Prévention des pollutions et des risques, Paris.

MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE [MEDD], (2004), « Les inondations », dossier d'information, Direction de la Prévention des pollutions et des risques, Paris.

MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE [MEDD], (2005), « Eléments pour l'élaboration des plans de prévention du risque inondation. La mitigation en zone inondable. Réduire la vulnérabilité des biens existants », document d'étape, Direction de la Prévention des pollutions et des risques, 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.

PROVITOLLO D., (2001), « Modélisation et simulation du risque d'inondation en milieu urbain méditerranéen » in : V^e Rencontres de Géographie Théorique et Quantitative ThéoQuant, Besançon.

ROUSSEL P. (dir.), (1998), « Guide pratique de la méthode Inondabilité », in : Etudes Inter-Agences n°60, Agences de l'eau.

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.

THYWISSEN K., (2006), « Components of Risk. A Comparative Glossary », in : SOURCE Studies Of the University : Research, Consuel, Education, Publication Series of UNU-EHS, n°2/2006.

SAATY T. L., (1980), « The Analytic Hierarchy Process », McGraw-Hill, New York.

SCARWELL H.-J., LAGANIER R., (2004), « Risque d'inondation et aménagement durable des territoires », Villeneuve d'Ascq, Presses Universitaires du Septentrion.