



POLYTECH[®]
TOURS

Département
Aménagement et Environnement



Ecole d'ingénieurs
polytechnique
de l'université de Tours

CITERES
UMR 6173
Cités, Territoires,
Environnement et Sociétés

Equipe IDA-DE
UMR 7324
Ingénierie de Projets
d'Aménagement, Paysage,
Environnement

Projet de Fin d'Etudes

LES MEGAPOLES DES PAYS EMERGENTS FACE AUX RISQUES

FOREAU Clémence
GUESDON Sébastien



2017-2018

Directeur de recherche

VERDELLI Laura

(Page de Titre)

LES MEGAPOLES DES PAYS EMERGENTS FACE AUX RISQUES

VERDELLI Laura

FOREAU Clémence

GUESDON Sébastien

2017/2018

Avertissement

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

Les auteurs de cette recherche ont signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir-faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Ingénierie du Projet d'Aménagement, Paysage et Environnement de l'UMR 6173 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

REMERCIEMENTS

Nous souhaitons dans un premier temps remercier notre encadrante Madame VERDELLI Laura, ainsi que nos professeurs Messieurs SERRIHNI Kamal et MAIZIA Mindjid, pour leurs conseils et leurs remarques constructives.

Nous tenons également remercier Monsieur RUFAT Samuel pour sa disponibilité et son aide pour la compréhension de ses travaux.

Nous finirons en remerciant nos camarades pour nos échanges qui nous ont permis d'avancer et de prendre en compte des avis divergents.

Merci,

INTRODUCTION

Depuis le début des années 2000, la population urbaine représente près de 50% de la population mondiale, et 80% de celle-ci se concentre dans les grandes villes. En effet, le nombre de villes de plus de 8 millions d'habitants est grandissant, il était de 28 en 2014 et on comptabiliserait plus de 30 mégapoles aujourd'hui. La plupart d'entre elles sont situées à proximité d'un littoral ou d'un cours d'eau, le phénomène de réchauffement climatique et ses conséquences soulèvent par conséquent de nouvelles problématiques.

A quelles mesures les systèmes urbains aggravent-ils les effets de phénomènes naturels ? Les espaces urbains sont-ils face à des risques spécifiques ? Le risque indique-t-il un dysfonctionnement des systèmes urbains ? La mégapolisation comporte-t-elle en son sein une nouvelle forme de vulnérabilité ? Les pays sont-ils à égalité face à ces risques ?

Les espaces urbains et d'autant plus les mégapoles, sont l'objet de risques différés, induits... Cette chaîne de risques peut ainsi allier : risques naturels, technologiques, économiques, etc... Il faut toutefois distinguer le risque de la catastrophe. Les villes peuvent être sujettes à des aléas, il existe donc un risque, sans subir de dommages référant à une catastrophe.

L'ensemble des phénomènes naturels causant un risque peuvent être regroupés en deux types d'aléas : les aléas hydroclimatiques et d'origine géologique. Les premiers peuvent prendre de nombreuses formes : épisodes de sécheresse, ouragans, remontées de nappes, mouvements de masses littorales, moussons, ruissellement... Celles-ci peuvent de plus se combiner, ce qui explique notamment que les aléas hydroclimatiques causent près de 80% des catastrophes d'origine naturelle. L'autre part des catastrophes naturelles résulte donc d'aléas d'origine géologique, principalement les aléas sismiques et volcaniques, qui peuvent être liés. De plus, les actions humaines peuvent amplifier un risque naturel mais également le provoquer, notamment avec les effets du réchauffement climatique.

Le second volet agissant sur le risque, en plus de l'aléa, est la vulnérabilité des espaces. Les territoires urbains et notamment les mégapoles, sont particulièrement vulnérables. Cette vulnérabilité peut être humaine, organisationnelle, économique, sociale... Elle nécessite donc une approche systémique, mais celle-ci se révèle souvent compliquée du fait des nombreuses interactions caractéristiques de l'urbain, et encore plus lorsqu'il s'agit de mégapoles.

« La ville multiplie, amplifie, diversifie les facteurs de vulnérabilité, laquelle découle du fonctionnement même de la ville, de ses logiques d'organisation spatiale et des dynamiques territoriales. »

(Chocat, Veyret)

En prenant compte ces éléments, la gestion du risque apparaît comme extrêmement compliquée. Les mégapoles des « pays riches » font face à cette complexité notamment avec leur centre ancien qui est bien souvent établi à proximité d'un cours d'eau sans toutefois être adapté au risque. Mais cette tâche revêt un caractère d'autant plus difficile pour les mégapoles des pays « pauvres ». En effet, elles connaissent d'importants flux de population souffrant de la pauvreté et quittant les campagnes pour

rejoindre les villes. Ces personnes s'installent dans des quartiers informels généralement situés dans les espaces les plus sujets à l'aléa. Le risque y est renforcé par une forte ségrégation sociospatiale.

Que l'aléa soit d'origine hydroclimatique ou géologique (sismique, volcanique ...), il doit être analysé conjointement à la vulnérabilité des tissus urbains pour mieux appréhender le risque, et ainsi pouvoir le réduire. La multiplicité des facteurs impliqués dans ces deux phénomènes rend leur étude particulièrement complexe. Néanmoins, pour être efficace la gestion des Mégalopoles doit intégrer le risque dans son intégralité, et ainsi évaluer les possibles effets induits. Le risque intègre l'aléa et l'impact de celui-ci sur un territoire vulnérable, il comprend donc deux pôles essentiels : l'aléa et la vulnérabilité. En effet, les conséquences comparées des catastrophes naturelles récentes montrent une inégalité entre les pays dits « développés », qui sont « préparés » et constatent des dégâts nettement moindres, et les pays dits « en développement ». Le risque révèle donc une inégalité sociale entre les pays, et peut ainsi être considéré comme indicateur de cette inégalité.

Notre Projet de Fin d'Etudes se propose de caractériser la situation actuelle des Mégalopoles en développement face aux risques naturels, en particulier au risque inondation, et d'avancer des pistes de recherches afin de réduire leurs impacts. Il se décompose en deux chapitres. Le premier se concentrera sur la compréhension de la notion de vulnérabilité urbaine et des méthodes entreprises pour l'estimer. Cette démarche permettra de formaliser des hypothèses de caractérisation de la vulnérabilité urbaine basées sur divers indicateurs. L'objectif du second chapitre étant de tester les hypothèses énoncées, sur un territoire spécifique. L'étude sera réalisée à Chennai, en Inde, tout en tentant de la rendre, en partie, généralisable pour les mégapoles des pays en développement.



LES MEGAPOLES DES PAYS EMERGENTS FACE AU RISQUE

Notion de vulnérabilité urbaine

Résumé

Etude de la vulnérabilité urbaine et des méthodes entreprises pour l'estimer. Formalisation d'hypothèses de caractérisation de la vulnérabilité urbaine basées sur divers indicateurs.

T ABLE DES MATIERES

AVERTISSEMENT	1
A PROPOS	2
REMERCIEMENTS	3
INTRODUCTION	4
LEXIQUE	34
LA PLACE DE LA VULNERABILITE DANS LA LITTERATURE	8
1. Historique de la perception du risque.....	8
2. Emergence de la vulnérabilité : un débat scientifique	9
3. Différentes approches de la vulnérabilité	12
LE TRAITEMENT ANALYTIQUE DE LA VULNERABILITE	15
1. Le traitement de la vulnérabilité de la population.....	15
2. Le traitement de la vulnérabilité du bâti.....	18
LE TRAITEMENT SYSTEMIQUE DE LA VULNERABILITE	25
1. Principe général : modèle MADS.....	25
2. Traitement selon un diagramme Stocks-flux	26
3. Traitement statistique et spatial	29
CONCLUSION	33
BIBLIOGRAPHIE.....	35

LA PLACE DE LA VULNERABILITE DANS LA LITTERATURE

1. Historique de la perception du risque

Historiquement le risque a longtemps été considéré comme une fatalité, liée uniquement à l'aléa. Or, un tremblement de terre ayant eu lieu en Algérie en mai 2003 a fait près de 2 500 victimes alors qu'un même phénomène d'une intensité nettement supérieure a touché le Japon peu de temps après sans faire de victime, « seulement » des blessés et des dégâts matériels. Les conséquences variant selon le territoire touché par l'aléa, l'existence d'une autre composante, importante par expériences, est mise en avant. Si on fait l'analogie avec la médecine, depuis l'Antiquité les médecins reconnaissent la vulnérabilité comme un élément clé de la survie des individus, des patients, lors des épidémies par exemple.

Aux Etats-Unis, l'estimation des vulnérabilités est apparue dans les années 1950 avec le *floodplain management*. A l'initiative de cette démarche, l'Université de Chicago multiplie les recherches sur cette thématique et devient ainsi un réel précurseur.

C'est toutefois Les années 90 qui seront un tournant pour l'analyse du risque. On aboutit à deux définitions officielles de celui-ci ; l'une française et l'une internationale.

- En 1997, d'après le ministère français de l'environnement le risque est le résultat de « la conjonction d'un aléa et des enjeux en présence », soit la présence d'enjeux (entreprises, administrations...) sur un territoire touché par un aléa.
- De son côté, l'ONU a placé la réduction des catastrophes naturelles en tant qu'enjeu majeur (Décennie Internationale pour la Prévention des Catastrophes Naturelles), ce qui a conduit à redéfinir les concepts, les méthodes et les outils. Il y a un passage de la vision du risque comme une altérité, le « hazard paradigm », à la prise en compte du risque comme une construction sociale, physique, fonctionnelle... Le risque est alors associé à « *l'espérance mathématique de pertes en vies humaines, blessés, dommages aux biens et atteintes à l'activité économique au cours d'une période de référence et dans une région donnée, pour un aléa particulier.* » Le risque est donc, d'après cette définition, le produit de l'aléa par la vulnérabilité.

Les concepts ont donc évolué et les outils ont été enrichis grâce à l'informatique, mais les méthodes restent basées sur des modèles additifs, qui ne prennent pas en compte les interactions complexes entre les différentes dimensions de la vulnérabilité.

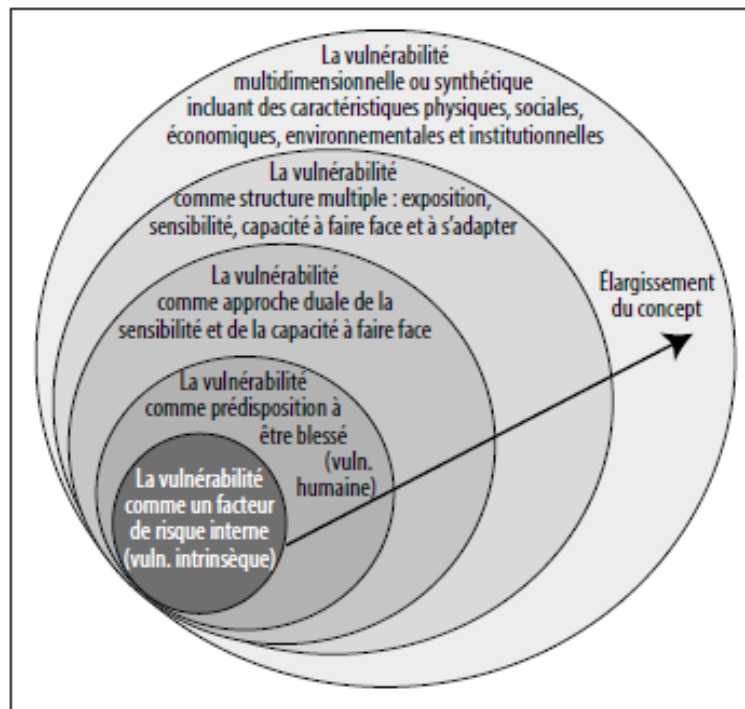
2. Emergence de la vulnérabilité : un débat scientifique

Pour la suite de l'étude, nous nous appuyerons sur la seconde définition. Le risque s'expliquant par l'alliance d'un aléa et d'une vulnérabilité. Quand l'aléa a fait l'objet de recherches par des spécialistes depuis de nombreuses années, la vulnérabilité n'est que très peu étudiée, et encore moins analysée conjointement avec l'aléa. (Theys, Fabiani, 1987). Ce constat perdure, Claude Gilbert affirme « Il est peut-être temps de prendre au sérieux la vulnérabilité et d'engager à son sujet des recherches tout aussi longues et complexes que celles concernant les aléas » (Gilbert, 2006). Le nombre de catastrophes constatées grandissant et leurs impacts humains, économiques... de plus en plus importants, de nombreux chercheurs attirent l'attention sur l'étude de la vulnérabilité.

Les différents travaux font évoluer le concept, et D'Ercole énonce en particulier que « La vulnérabilité apparaît comme la propension d'une société donnée à subir des dommages en cas de manifestation d'un phénomène naturel ou anthropique. Cette propension varie selon le poids de certains facteurs qu'il est nécessaire d'identifier et d'analyser car ils induisent un certain type de réponse de la société ». Ainsi, la vulnérabilité n'est plus seulement considérée comme l'ensemble des dommages causés par un aléa, mais prend aussi en compte les facteurs sociétaux qui agissent sur la « fragilité » d'une société face à un aléa. Il apparaît dès lors une différenciation entre les vulnérabilités :

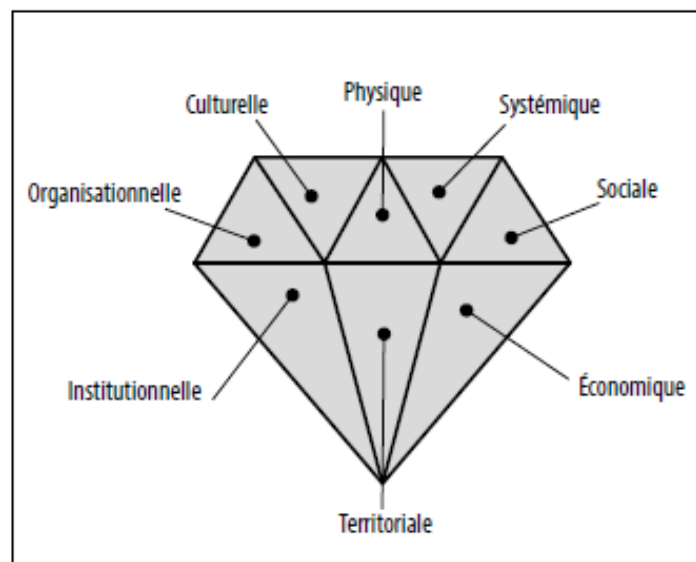
- « structurelle » ou « physique », correspondant à l'endommagement physique d'un aléa sur des enjeux (bâtiments, réseaux, infrastructures, populations..), facilement quantifiable.
- « sociale », relatant la capacité d'une société à faire face à une crise. Autrement dit, « elle renvoie à une série de caractéristiques liées aux personnes, aux communautés et à leur environnement qui incluent le bien-être initial (statut nutritionnel, santé physique et mentale), les moyens d'existence (ressources et capitaux, revenus et qualifications) et le niveau de développement (taux d'urbanisation, taux de croissance et de vitalité économique...), l'autoprotection (capacités et volonté de construire une habitation sûre et d'utiliser un site sûr), la protection sociale (mesure de préparation et d'atténuation), les réseaux sociaux et politiques, ou encore les institutions (capital social, environnement institutionnel et les proches). » (Quenault) Une classification des facteurs de la vulnérabilité sociale a été proposée (D'Ercole et Thouret, 1996), mais étant régulièrement dépendants les uns des autres, leurs interactions rendent ces facteurs difficilement quantifiables.
- « synthétique », tentant de lier les vulnérabilités structurelles et sociales au sein d'un même système multidimensionnel.

Les recherches sur la vulnérabilité urbaine ont abouti à « une complexification et un élargissement progressif du concept » (Birkman, 2005). Il y a d'après l'auteur un passage d'une vulnérabilité intrinsèque à une vulnérabilité multidimensionnelle.



Evolution du concept de vulnérabilité (Source : Quenault, d'après Birkman)

Le concept multidimensionnel, le plus large, de la vulnérabilité a été symbolisé par « l'analogie du diamant » par Parker (2009). Dans cette proposition, l'emplacement et l'importance des facettes ne sont pas représentatifs, et leur nombre est encore aujourd'hui discuté.



La vulnérabilité par analogie du diamant (Source: Parker, 2009)

La définition et prise en considération de la vulnérabilité urbaine restent des questions d'actualité, et font l'objet de perpétuelles remises en question. Toutefois, pour conclure sur l'évolution du concept de vulnérabilité urbaine et ses différentes définitions, il est important de retenir que le caractère destructeur et meurtrier des catastrophes est aujourd'hui, plus fortement lié à la vulnérabilité des territoires, qu'à la méconnaissance de l'aléa. Traiter que du risque naturel est restrictif, puisque les villes font l'objet d'une chaîne de risques avec des risques induits, des risques différés... L'urbain est construit sur divers systèmes organisationnels, la tendance actuelle à la concentration de la population dans des villes, toujours plus grandes, complexifie donc le phénomène de vulnérabilité. Ainsi, les nombreuses interdépendances qui composent les systèmes urbains provoquent une diffusion du risque. Ces systèmes se caractérisent par leur interaction¹, leur globalité², leur organisation³ et leur complexité⁴. La vulnérabilité des espaces urbains est donc multifactorielle et inégalitaire entre les pays dits « développés » et ceux « en développement ». Notamment, du fait que la population de certains pays émergents accepte toujours le risque, considéré comme une épreuve envoyée par un Dieu, que d'autres pays se résignent à subir le risque, faute de moyens jugés suffisants pour limiter les impacts, ou encore une gestion post-catastrophe inefficace, révélant ainsi une vulnérabilité sociale importante.

En ce qui concerne la suite de notre étude, elle se concentrera sur les espaces urbains des pays émergents qui font face au risque, et plus particulièrement les mégalo-poles.

¹ L'interaction : le système est constitué d'interactions, d'interrelations fortes entre ses différentes composantes et / ou avec l'extérieur. Ainsi, K.-L. Von Bertalanffy parle d'un « *ensemble d'unités en interrelations mutuelles* » et E. Morin d' « *unités globales organisées d'interrelations entre éléments, actions ou individus* » (cités par Durand, 1979). (Source : De la vulnérabilité à la résilience : mutation ou bouleversement ? **Bruno Barroca, Maryline DiNardo et Irène Mboumoua**)

² La globalité : le système doit être considéré comme un tout, et pas seulement comme une somme d'éléments. Von Bertalanffy (1998) montre ainsi que le système n'est pas réductible à ses parties. D. Durand affirme quant à lui que « *le tout est davantage qu'une forme globale, il implique l'apparition de qualités émergentes que ne possédaient pas les parties* » (1979). L'objet est ainsi pensé dans sa totalité de structure de fonctionnement et d'évolution (Le Moigne, cité par Lajoie in Guermond, 2005) (Source : De la vulnérabilité à la résilience : mutation ou bouleversement ? **Bruno Barroca, Maryline DiNardo et Irène Mboumoua**)

³ L'organisation : c'est la caractéristique centrale du système. Elle décrit à la fois l'état et les processus qui construisent le système. Elle concerne donc l'aspect structurel (de quoi est fait le système ?) et fonctionnel (comment fonctionne le système ?). Cette dernière caractéristique du système (aspect fonctionnel) est une nouveauté par rapport à l'approche positiviste. Elle introduit la notion de finalité. Comme le dit J.-L. Le Moigne (1977), le système ne nous intéresse pas « *d'abord par ce qu'il est, mais par ce qu'il fait et ce qu'il subit, donc par ce qu'il devient* ». L'aspect fonctionnel permet de décrire les processus dynamiques qui sous-tendent l'évolution du système. J. De Rosnay, dans son ouvrage de vulgarisation de la systémique *Le Macroscop*e insiste fortement sur cet aspect dans sa définition du système : pour lui un système est un « *ensemble d'éléments en interaction dynamique organisé en fonction d'un but* ». (Source : De la vulnérabilité à la résilience : mutation ou bouleversement ? **Bruno Barroca, Maryline DiNardo et Irène Mboumoua**)

⁴ La complexité : alors que la logique cartésienne prône une simplification de tous les phénomènes en éliminant l'inconnu ou l'aléatoire, l'approche systémique met en exergue la complexité quitte à ne pas étudier totalement le système. Cette complexité est issue du nombre et des caractéristiques des éléments du système et des liaisons, de l'incertitude par rapport à l'aléa issu de l'environnement (Durand, 1979). (Source : De la vulnérabilité à la résilience : mutation ou bouleversement ? **Bruno Barroca, Maryline DiNardo et Irène Mboumoua**)

3. Différentes approches de la vulnérabilité

Comme vu précédemment, la définition de la vulnérabilité n'est pas unanime et universelle. Des articles consacrés au sujet ont comptabilisé une trentaine de définitions de la vulnérabilité. (Adger, 2006). Les différentes études publiées depuis les années 1990 sous l'impulsion des organismes internationaux se décomposent toutefois selon deux principales approches de la vulnérabilité : analytique et synthétique.

Notamment adoptée par le guide français des Plans de Prévention des Risques Naturels, l'approche analytique de la vulnérabilité la définit comme « l'expression du niveau de conséquences prévisibles d'un phénomène naturel sur les enjeux ». On entend généralement par enjeux, les divers sujets potentiellement touchés par l'aléa : la population, les biens et le milieu. Les enjeux varient toutefois selon la forme de l'aléa. Lorsqu'ils sont déterminés pour un aléa, une évaluation des dommages prévisibles est alors réalisée selon des niveaux de celui-ci.

« Analytique : qui résulte d'une décomposition d'un tout en ses parties » Larousse

Première approche de la vulnérabilité à être intégrée au secteur de l'urbanisme, la vulnérabilité analytique aboutit à la création de cartes thématiques qui reposent sur des indicateurs relatifs à la population, aux réseaux ou encore au bâti. Ces indicateurs sont l'objet de recherches générales, mais sont également amenés à être adaptés en fonction du terrain d'étude.

Ce traitement de la vulnérabilité décompose donc les différents enjeux reconnus en « sous enjeux », pouvant également être décomposés, etc... Les enjeux économiques peuvent par exemple, être calculés à partir des dommages estimés dans les secteurs primaires, secondaires et tertiaires, ou plus précisément au sein de chaque mode de culture, d'élevage, etc... De plus la traduction des dommages estimés, et donc l'expression de la vulnérabilité en elle-même, peut varier ; de manière absolue avec le nombre de victimes par exemple, ou de manière relative (ou pourcentage) en l'exprimant en fonction du nombre de personnes présentes dans la zone touchée par l'aléa. Pour le risque inondation, selon la deuxième version d'interprétation, les villes où une grande part de la population est située en zone inondable, auront une forte vulnérabilité. Il existe donc une multitude de vulnérabilités, puisqu'indéfiniment décomposable, avec autant d'unités de mesure, et il est compliqué d'exprimer une vulnérabilité totale. En effet, en traitant les indicateurs de manière absolue, il est difficile de relier des tonnes de céréales perdues et un nombre de vies perdues. De manière relative, les indicateurs peuvent être ajoutés, en appliquant une pondération selon leur nombre (Chardon, 1994), on obtient alors une vulnérabilité totale moyenne. Ce résultat a l'inconvénient de pouvoir rendre deux situations opposées comparables. De manière simplifiée, une même vulnérabilité moyenne basée sur deux indicateurs économique et humain, peut être causée par une forte vulnérabilité humaine et une faible vulnérabilité économique, et inversement. La première situation pouvant traduire celle d'une ville d'un pays en développement, et l'inverse celle d'une ville d'un pays développé.

Une des solutions serait d'exprimer ces divers indicateurs en une même unité de mesure. Un des exemples, est la vulnérabilité comptable utilisée par les organismes d'assurance notamment. La vulnérabilité comptable exprime l'ensemble des données selon des termes monétaires afin d'estimer la valeur marchande des dommages prévisibles en cas de catastrophe. Cette démarche repose sur :

- La caractérisation de l'occupation du sol et de sa vulnérabilité
- La quantification des impacts selon l'aléa
- La monétarisation des impacts engendrés
- L'évaluation du coût des dommages

Elle pose le problème de l'estimation de la perte d'une vie humaine, d'une destruction d'éléments patrimoniaux, d'une modification organisationnelle, par exemple, en une unité monétaire unique.

L'approche analytique aborde donc la vulnérabilité à partir de « l'endommagement potentiel des hommes, des biens et du milieu » (Provotilo), ou encore « l'identification de facteurs de vulnérabilité » (Dauphiné, 2004). Ces facteurs identifiés, ils sont traduits en indices de vulnérabilité par analyse matricielle ou algorithmique. Cela permet de cartographier la vulnérabilité de quartiers à partir de facteurs techniques, physique, socio-économiques... mais l'analyse repose sur le choix de seuils arbitraires et conduit souvent à une simplification du problème basée sur un ou deux indicateurs. En effet, comme énoncé, ces facteurs sont, selon les méthodes, multipliés ou additionnés pour aboutir à un nombre réduit d'indicateurs, ce qui efface les interactions entre les différents facteurs, pourtant primordiales pour étudier la vulnérabilité. De plus, les résultats sont spécifiques à la ville d'étude, donc difficilement transposables, et cette approche n'intègre pas de réflexion sur des éléments aggravants ou influant sur la capacité de réponse des villes. De nombreux auteurs critiquent l'utilisation de cette approche. Beraud, en s'appuyant sur les travaux de Lemoigne, a résumé ce changement de position pour définir la vulnérabilité.

Préceptes de l'approche analytique	Causes du changement de précepte	Préceptes de l'approche systémique
ÉVIDENCE : Pour être considérée tout doit être démontré.	→ La recherche de l'évidence n'est pas toujours possible.	PERTINENCE : Pour être considérés, les objets doivent s'avérer pertinents au vu des intentions implicites et explicites du modélisateur.
REDUCTIONNISTE : Décomposition de l'objet à étudier en autant de parcelles que possible.	→ Difficulté de l'exercice. Ne paraît pas dans tous les cas pertinent car ne permet pas toujours l'intelligence complète de l'objet.	GLOBALISTE : Perception de l'objet inséré dans un plus grand tout. Implique l'ouverture
CAUSALISTE : Compréhension d'un objet et de son fonctionnement régie par des lois de causes à effets.	→ Ne nous informe en rien sur la finalité de l'objet.	TELEOLOGIQUE : Compréhension de l'objet et de son fonctionnement à travers son comportement par rapport aux projets que l'on attribue à l'objet.
EXHAUSTIVITE : Dénombrement complet des objets à étudier de manière à ne rien omettre.	→ Difficulté de l'exercice. L'exhaustivité est rarement possible.	AGREGATIVITE : Sélection des éléments pertinents pour l'étude sans assurer la totalité de l'interprétation.

La notion de vulnérabilité synthétique est alors recommandée, en tant que « capacité d'un système à se soustraire ou à surmonter une crise » (Provotilo) ou comme la « capacité d'une personne ou d'un groupe à anticiper, tenir le coup, résister et reconstruire après les impacts provoqués par une catastrophe » (Blaikie, Cannon, Davis et Wisner). Cette seconde approche appréhende la vulnérabilité urbaine selon les « facteurs favorables aux endommagements ou influant sur la capacité de réponse des sociétés à une situation catastrophique » (Provotilo). Le concept général de la systémique est né de courants de pensées tel que le structuralisme⁵, la cybernétique⁶ mais aussi de la théorie de

⁵ Structuralisme : mouvement développé au début du XXe siècle dans les sciences sociales (linguistique, anthropologie, etc.). La notion de structure permettrait de mieux appréhender les systèmes, de formaliser et de donc de généraliser. (Source : De la vulnérabilité à la résilience : mutation ou bouleversement ? **Bruno Barroca, Maryline DiNardo et Irène Mboumoua**)

⁶ Cybernétique : représentation du comportement, du fonctionnement des machines. Couffignal : « la cybernétique c'est l'art et la science d'assurer l'efficacité de l'action » (Cité par D. Durand, 1979). (Source : De la vulnérabilité à la résilience : mutation ou bouleversement ? **Bruno Barroca, Maryline DiNardo et Irène Mboumoua**)

l'information⁷. Cette méthode de traitement est perçue comme « révolutionnaire » puisqu'elle tente de comprendre « l'intelligence » d'un phénomène et ainsi d'adapter les actions de prévention. En appliquant cette démarche à l'étude de la vulnérabilité urbaine, on passe alors d'un statut passif de la vulnérabilité à sa considération en tant que composante active. Intégrant les vulnérabilités dites « physique » et « sociale », elle tente alors d'exprimer la fragilité d'un territoire de manière globale, et indirectement sa capacité à surmonter les impacts de l'aléa, mais aussi son aptitude à recouvrir sa situation initiale, c'est-à-dire sa résilience. La démarche s'appuie sur la systémique pour percevoir les interactions qui sont « à l'origine de la vulnérabilité » (Perrow). L'analyse de cette vulnérabilité repose donc sur celle de différents facteurs : sociaux (âge, richesse ... des individus), techniques (matériaux de construction, agencement du bâti, des réseaux...), organisationnels (prévention du risque et gestion de la crise coordonnées...), etc... et de leurs interactions dans un environnement. Elle vise ainsi à combler les lacunes d'une analyse sectorielle (approche analytique), qui ne prend pas en compte le lien entre les diverses échelles spatiales de la ville.

La considération de la vulnérabilité systémique selon un modèle « Stock-flux » est très répandue. Elle permet de représenter l'ensemble des indicateurs à prendre en compte dans un même schéma tout en mettant en avant leurs interactions. Ce modèle établit donc des liens entre aléa et les stock et flux, il retranscrit l'approche quantitative du risque avec l'endommagement potentiel mais aussi l'approche qualitative avec la résilience urbaine et humaine. Divers auteurs sont adeptes de cette méthode, et en particulier Damien Provitolo qui utilise de tels diagrammes, notamment pour traiter l'aléa inondation impactant un système urbain, dans son article « *Modélisation et simulation du risque inondation en milieu urbain méditerranéen* ». ⁸

⁷ Théorie de l'information : travail sur la science de l'information, des signes, et du traitement de l'information. (Source : De la vulnérabilité à la résilience : mutation ou bouleversement ? **Bruno Barroca, Maryline DiNardo et Irène Mboumoua**)

⁸ Cette méthode sera abordée plus en détails dans la troisième partie de ce rapport.

LE TRAITEMENT ANALYTIQUE DE LA VULNERABILITE

1. Le traitement de la vulnérabilité de la population

L'analyse sectorielle se décompose donc selon les 3 principaux sujets de la vulnérabilité : la population, le bâti et les réseaux. Dans le paragraphe suivant nous aborderons la vulnérabilité de la population, en nous concentrant sur celle se trouvant dans des bâtiments. Les flux de populations sur les réseaux routiers ou plus généralement sur l'espace public, doivent faire l'objet d'une étude complémentaire.

Partant du postulat qu'une population en danger de mort immédiat est vulnérable, nous avons défini la vulnérabilité de la population au sein du bâti en fonction de la distance du bâtiment à l'aléa et à la hauteur de ce bâtiment. Si le premier facteur semble évident puisqu'il impacte directement sur la hauteur d'eau qui sera présente dans chaque zone, le second fait écho à la mise en place d'une évacuation verticale, c'est-à-dire que les personnes se trouvant dans les étages touchés par l'inondation peuvent se réfugier dans les étages supérieurs. Nous avons toutefois conscience que cette définition est simplifiée et que la prise en compte de facteurs supplémentaires pourrait aboutir à des résultats plus fins.

La démarche visant à définir un coefficient de vulnérabilité pour chaque bâtiment, et par conséquent pour la population s'y trouvant, nécessite de découper la zone en classes de distances à l'aléa et de classer les bâtiments selon leur hauteur. La définition de ces classes est résultat d'hypothèses de travail, ici basée sur le nombre de personnes en danger de mort immédiat. L'élargissement de la démarche à la population qui risque d'être isolée par exemple, demanderait une redéfinition de ces classes et des valeurs associées.

Nos hypothèses de travail, classes et valeurs associées, s'appuie sur des recherches bibliographiques et des choix personnels, et restent discutables et adaptables par des travaux de terrains ou de recherches plus approfondis sur un territoire particulier. Notre volonté première était de présenter la méthode.

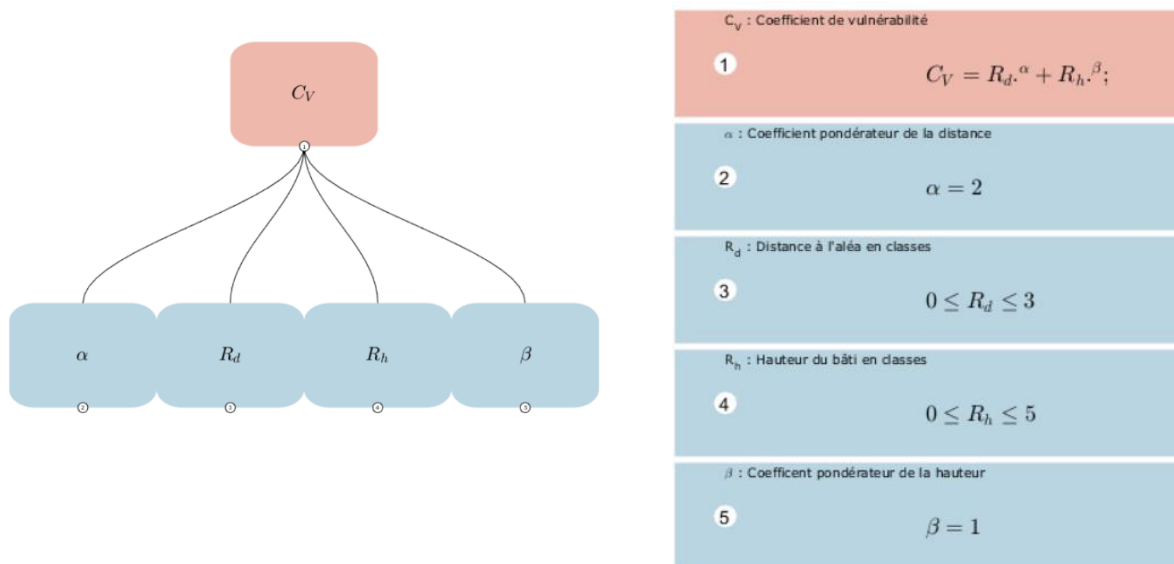
Facteur de la distance à l'aléa :

Distance à l'aléa du bâtiment (en m)	Valeur de vulnérabilité associée
< 300	3
300 < d < 600	2
600 < d < 900	1
> 900	0

Facteur de la hauteur du bâti :

Nb d'étages du bâtiment	Valeur de vulnérabilité associée
0 (RdC)	5
1	3
> 1	0

Après avoir défini les différentes classes et leur valeur vulnérabilité associée, le calcul du coefficient de vulnérabilité global pour la population de chaque bâtiment repose sur le choix d'un modèle et de coefficients de pondération pour lier les facteurs et accorder plus ou moins d'importance à chacun d'eux. Nous avons opté dans un premier pour un modèle additif mis en application via le logiciel *TOASTER @Mindjid Maizia*, qui nous a de plus permis de faire varier les coefficients de pondération. Ce choix est guidé par le constat que la vulnérabilité ne peut être nulle. En effet, avec un modèle multiplicatif, une valeur nulle pour l'un des facteurs aboutirait à une valeur nulle de vulnérabilité.



Les variables R_d et R_h correspondent respectivement aux classes de distance et de hauteur précédemment présentées. Les coefficients pondérateurs ont été fixés à 2 pour la distance et 1 pour la hauteur, afin de favoriser le premier facteur que nous estimons plus déterminant de la vulnérabilité. Ces valeurs sont toutefois également ajustables d'après des enquêtes de terrains et des retours d'expériences. Les résultats obtenus sont les suivants :

		Distance à l'aléa (m)			
		< 300	300 < d < 600	600 < d < 900	> 900
Nb d'étages	0	14	9	6	5
	1	12	7	4	3
	> 1	9	4	1	0

Nous observons par exemple qu'avec ces conditions que des personnes se trouvant dans un bâtiment sans étage à une distance de l'aléa comprise entre 600 et 900m sont plus vulnérables que des personnes étant dans un bâtiment de plusieurs étages situé entre 300 et 600m de l'aléa.

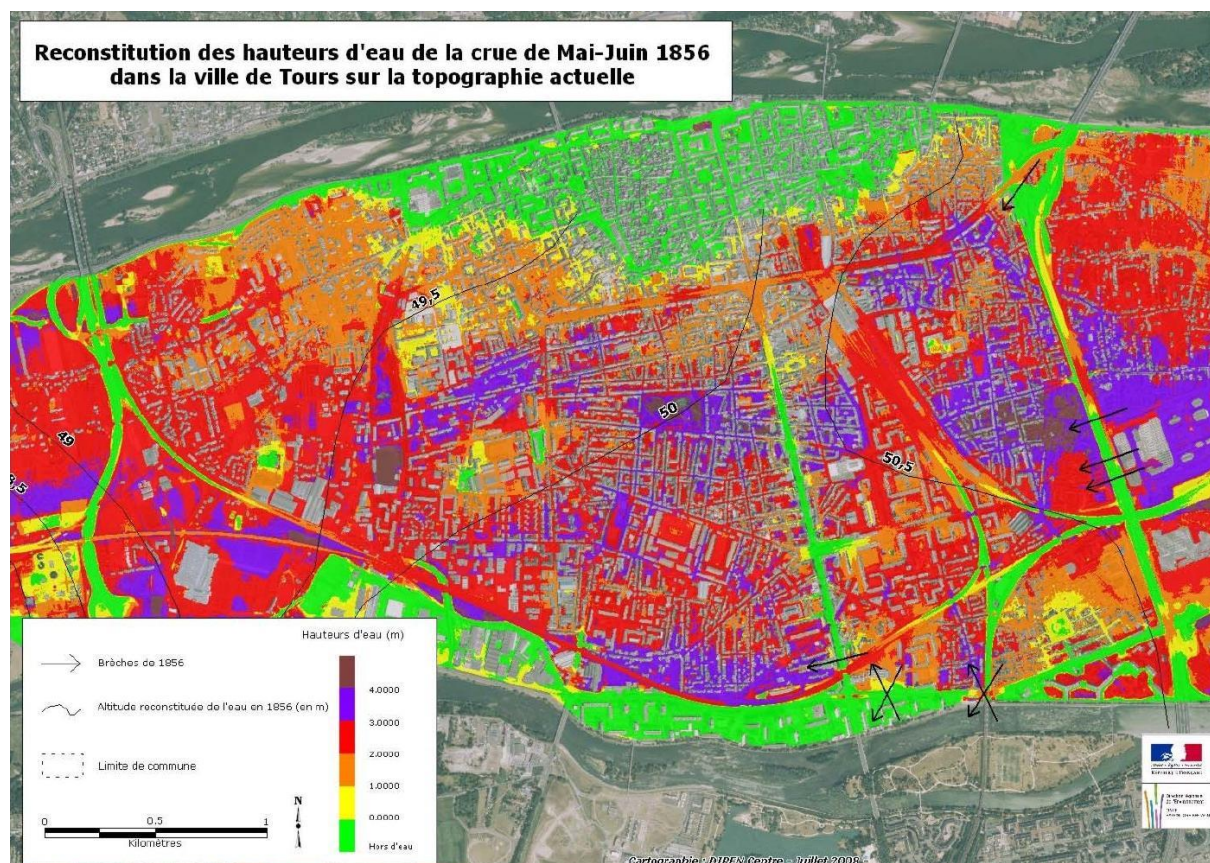
A noter que le 0 obtenu pour des bâtiments situés à plus de 900m de l'aléa et disposant de plusieurs étages, est théorique puisqu'en réalité, et comme énoncé précédemment, la vulnérabilité nulle n'existe pas.

Toutefois les valeurs théoriques du coefficient de vulnérabilité pour chacun des bâtiments permettent de spatialiser sur une carte chaque bâtiment selon ce coefficient. Connaissant le taux d'occupation de chaque bâtiment, une estimation de la population en danger immédiat. De plus, cette cartographie peut être utilisée pour ordonnancer un plan d'évacuation. Possédant les données nécessaires, nous

l'avons ici appliqué à la ville de Tours mais cela est possible pour tout territoire ayant un aléa et un bâti localisés et la hauteur de ce dernier.



Toutefois si nous comparons les résultats obtenus par notre calcul aux conséquences d'événements passés sur la ville de Tours, des différences notables apparaissent. En effet, nous avons caractérisé la hauteur d'eau dans la ville uniquement en fonction de la distance à l'aléa, or la reconstitution des hauteurs d'eau lors de la crue de 1856 montre qu'elles ne sont pas seulement liées à la distance à l'aléa. Nous observons en particulier que le quartier ancien, situé à proximité immédiate de la Loire, ainsi que le quartier d'habitat collectif des rives du Cher, sont « hors d'eau », malgré leur distance à l'aléa. L'intervention d'un facteur supplémentaire, la topographie de l'espace urbain, serait par conséquent à prendre en compte pour affiner les résultats.



Extrait du PPRI 2011-2012

Cette analyse comparative montre une première limite de notre étude, il serait donc nécessaire, dans le cadre d'une étude spécifique de la vulnérabilité sur Tours, d'approfondir les recherches sur ce territoire afin de définir au mieux les indicateurs à prendre en compte.

2. Le traitement de la vulnérabilité du bâti

Toujours dans le cadre d'une démarche analytique du traitement de la vulnérabilité urbaine, nous nous sommes intéressés à celle du bâti. L'objectif étant de pouvoir définir la vulnérabilité du bâti suivant des indicateurs à disposition préalablement définis. Pour ceci nous avons choisi d'utiliser la grille d'évaluation des vulnérabilités (Leforte.E 2004) et de l'adapter en fonction de l'étude que nous réalisons.

Cette méthode vise à définir des indices de vulnérabilité à partir d'indicateurs selon la vulnérabilité à définir. Pour notre étude, nous tenterons ainsi d'estimer la vulnérabilité dit « de construction » et celle « de préparation ». La première est relative aux caractéristiques intrinsèques de la construction du bâtiment, alors que la seconde fait référence l'adaptation ou non du bâtiment au risque.

Ces grilles d'évaluation peuvent être utilisées pour prioriser les actions sur un territoire en fonction des résultats obtenus, étant donné que la vulnérabilité globale est liée aux vulnérabilités dites "intermédiaires". Le lien avec les valeurs intermédiaires de vulnérabilité est fait selon un « modèle ». Celui-ci peut être additif, multiplicatif ou prendre une toute autre forme. Le calcul d'indices de vulnérabilité s'appuie sur des indicateurs devant être préalablement catégorisés selon plusieurs rangs. La classification repose sur un travail minutieux et consciencieux. Les informations doivent être collectées à partir d'enquêtes dans les lieux de décisions, auprès des acteurs majeurs du secteur traité. Des compléments à ces données sont de plus indispensables basés sur des retours d'expériences sur ce même territoire ou sur des territoires comparables. Il faut réussir à comprendre le territoire, sa politique, son contexte, les spécificités sociales et culturelles qui le caractérise. En suivant cette démarche il serait possible d'évaluer les critères en fonction de la situation locale et d'organiser une classification prenant des valeurs allant de 0 à 3.

Ici, la valeur 0 correspond à l'état le plus résistant et 3 au plus vulnérable. Cette hiérarchie et les éléments techniques associés, sont spécifique à un territoire. Une transposition sur un autre territoire implique une redéfinition des catégories.

Lors de l'estimation du coefficient global, une modification du modèle de calcul et/ou une pondération entre les indices pourront être mises en place sur la base du ressenti des acteurs audités, des retours d'expériences, et des enquêtes menées.

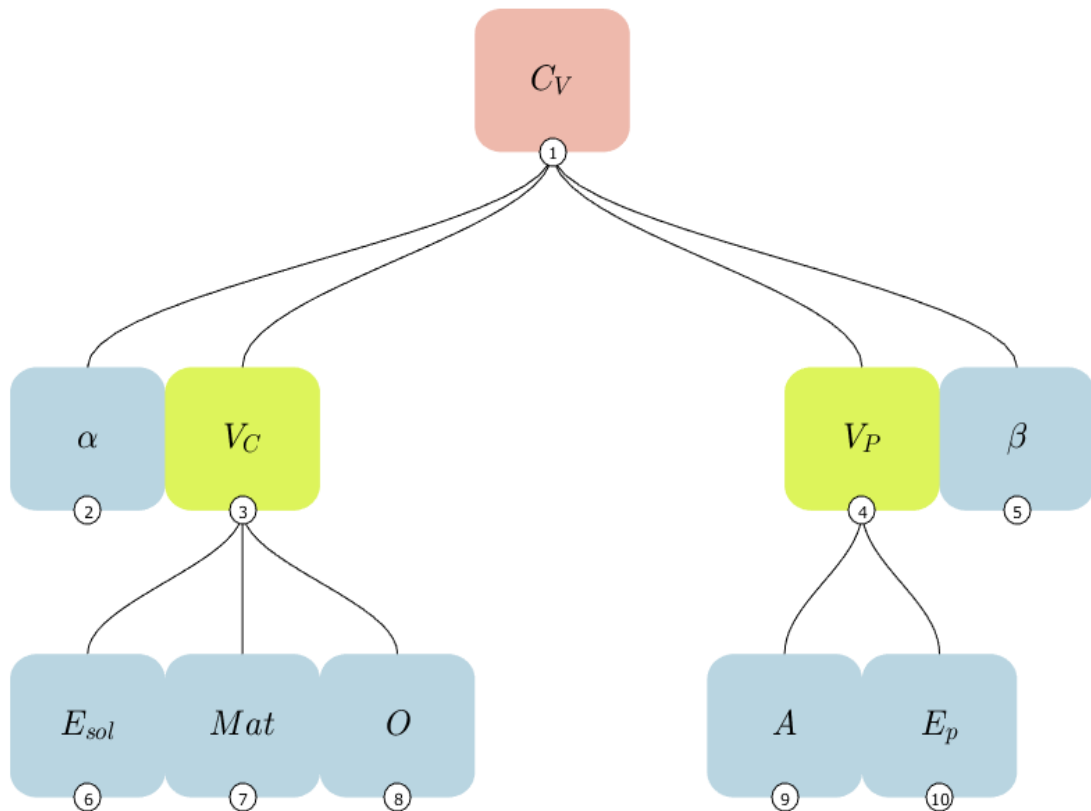
Nous avons ici adapté la grille existante et réalisé notre propre grille d'évaluation de la vulnérabilité du bâti :

Type de Vulnérabilité	Indicateurs	Sources d'informations	Evaluation vulnérabilité	Indice de vulnérabilité	Coefficient de vulnérabilité
Construction	Emprise au sol	Enquêtes Documents officiels Cadastre PLU PPR	0→1→2→3	Moyenne des indicateurs	Addition des indices
	Matériaux		0→1→2→3		
	Orientation		0→1→2→3		
Préparation	Aménagements		0→1→2→3	Moyenne des indicateurs	
	Elévation du plancher		0→1→2→3		

On peut donc obtenir les vulnérabilités thématiques pour chaque bâtiment ainsi que sa vulnérabilité globale. Cela permet de cartographier la vulnérabilité individuelle de chaque bâtiment pour ainsi

localiser les places fragiles présentes dans le tissu urbain. L'autre enjeu essentiel de cette méthode est d'avoir connaissance du type de faiblesse de chacun des bâtiments et de savoir sur quels critères agir pour diminuer cette vulnérabilité.

A partir de cette grille nous avons pu réaliser un modèle nous permettant de visualiser l'ensemble des indices de vulnérabilités et ainsi obtenir les coefficients possibles en fonction des indicateurs. Pour cela nous avons utilisé le logiciel *TOASTER* ©Mindjid Maizia afin d'organiser notre système logique et de calculer les valeurs.



C_v : Coefficient de vulnérabilité du bâti 1 $C_V = V_C^\alpha + V_P^\beta$	E_{sol} : Emprise au sol du bâti en m ² 6 $0 \leq E_{sol} \leq 5$
α : Coefficient pondérateur de l'importance de la construction 2 $\alpha = 1.5$	Mat : Matériaux de construction du bâti 7 $0 \leq Mat \leq 5$
V_C : Coefficient de vulnérabilité lié à la construction du bâti 3 $V_C = \frac{E_{sol} + Mat + O}{3}$	O : Orientation du bâti en unité 8 $0 \leq O \leq 5$
V_P : Coefficient de vulnérabilité dû à la préparation du bâti face à l'aléa 4 $V_P = \frac{A + E_p}{2}$	A : Aménagement lié à la protection de l'aléa 9 $0 \leq A \leq 5$
β : Coefficient pondérateur de la préparation à l'aléa 5 $\beta = 1$	E_p : Elevation du plancher par rapport au niveau du sol en m ² 10 $0 \leq E_p \leq 5$

La modélisation nous a permis de calculer l'ensemble des vulnérabilités possibles pour les bâtiments. On obtient ainsi la vulnérabilité de construction, de préparation et la vulnérabilité globale de chacun des bâtiments dans la mesure des informations accessibles et des approximations réalisées dans la catégorisation. Ces résultats restent affinaibles en prenant en compte la réalité du territoire.

Voici l'ensemble des valeurs que peut prendre l'indice de vulnérabilité de la préparation du bâti :

		Élévation du plancher			
Aménagements	Rangs	0	1	2	3
	0	0	0.5	1	1.5
	1	0.5	1	1.5	2
	2	1	1.5	2	2.5
	3	1.5	2	2.5	3

Pour les valeurs de la construction du bâti il existe 64 valeurs qui seront divisé en 4 tableaux avec l'indice de l'orientation variant de 0 à 3 :

Indice de vulnérabilité de construction avec Orientation = 0

		Emprise au sol			
Matériaux	Rangs	0	1	2	3
	0	0	0.33	0.67	1
	1	0.33	0.67	1	1.33
	2	0.67	1	1.33	1.67
	3	1	1.33	1.67	2

Indice de vulnérabilité de construction avec Orientation = 1

		Emprise au sol			
Matériaux	Rangs	0	1	2	3
	0	0.33	0.67	1	1.33
	1	0.67	1	1.33	1.67
	2	1	1.33	1.67	2
	3	1.33	1.67	2	2.33

Indice de vulnérabilité de construction avec Orientation = 2

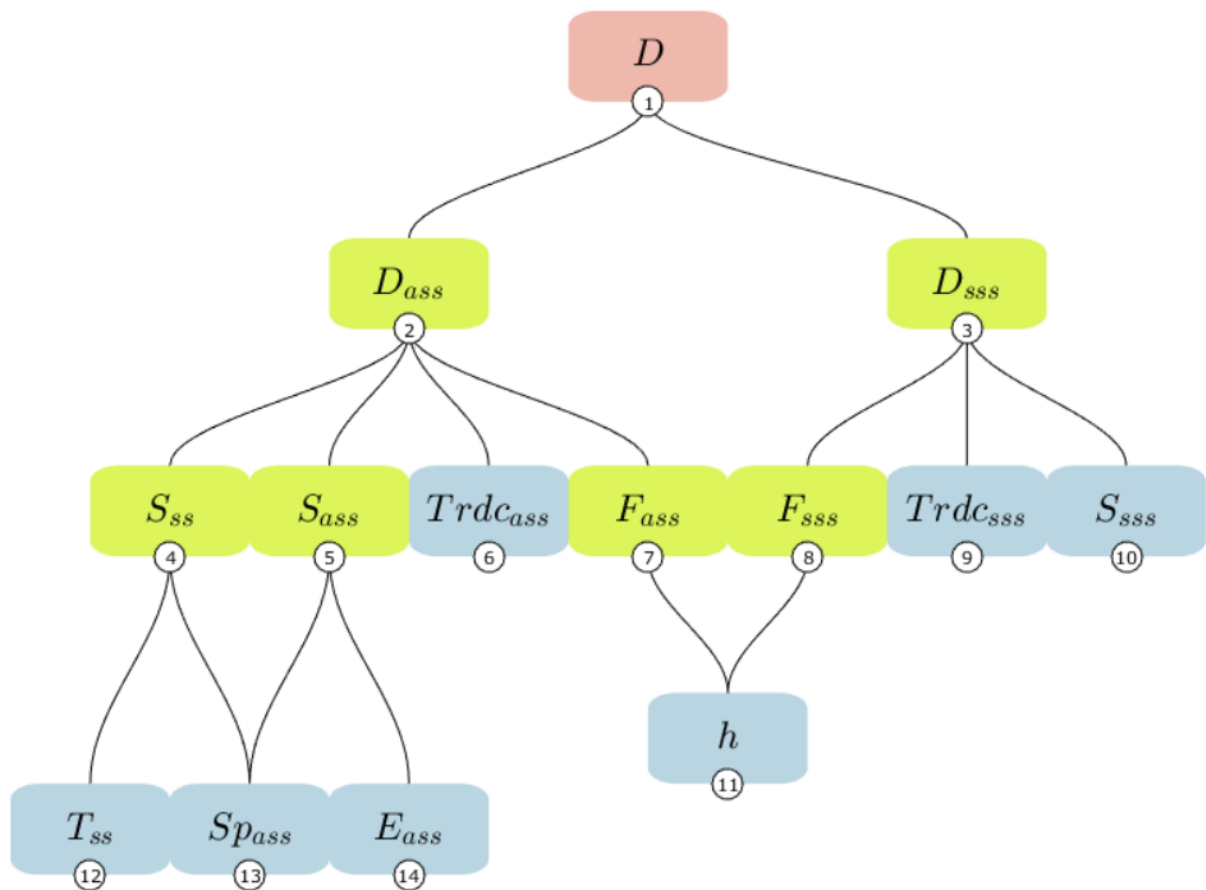
		Emprise au sol			
Matériaux	Rangs	0	1	2	3
	0	0.67	1	1.33	1.67
	1	1	1.33	1.67	2
	2	1.33	1.67	2	2.33
	3	1.67	2	2.33	2.67

Indice de vulnérabilité de construction avec Orientation = 3

		Emprise au sol			
Matériaux	Rangs	0	1	2	3
	0	1	1.33	1.67	2
	1	1.33	1.67	2	2.33
	2	1.67	2	2.33	2.67
	3	2	2.33	2.67	3

Nous pouvons donc obtenir le coefficient de vulnérabilité pour chacun des cas étudiés. VOIR ANNEXE

La vulnérabilité du bâti peut également être traitée de manière comptable avec une estimation monétaire des dommages. Une méthode est présentée par Julian Eleuterio, Sylvain Payraudeau et Anne Rozan dans leur travail sur *La sensibilité de l'évaluation des dommages associés aux inondations en fonction de la caractérisation de la vulnérabilité des bâtiments*. Ils définissent notamment les dommages des bâtiments résidentiels selon la relation suivante :



D : Dommages d'un ensemble de bâtiments en unité 1 $D = D_{ss} + D_{oss};$	$Trdc_{ss}$: Taux d'occupation du RDC (sans sous sol) 9 $0 \leq Trdc_{ss} \leq 1$
D_{oss} : Dommages des bat avec sous sol en unité 2 $D_{oss} = \sum (Trdc_{oss} \cdot S_{ss} \cdot S_{oss} \cdot F_{oss});$	S_{ss} : Superficie du bâtiment (sans sous sol) en m² 10 $0 \leq S_{ss} \leq +\infty$
D_{ss} : Dommages des bâtiments sans sous sol en unité 3 $D_{ss} = \sum (F_{ss} \cdot S_{ss} \cdot Trdc_{ss});$	h : Hauteur effective d'eau en cm 11 $0 \leq h \leq +\infty$
S_{ss} : Surface de sous sol en m² 4 $S_{ss} = T_{ss} \cdot Sp_{oss};$	T_{ss} : Taux de sous sol en % 12 $0 \leq T_{ss} \leq 100$
S_{oss} : Superficie du bâtiment (avec sous sol) en m² 5 $S_{oss} = Sp_{oss} \cdot E_{oss};$	Sp_{oss} : Surface plancher (avec sous sol) en m² 13 $0 \leq Sp_{oss} \leq +\infty$
$Trdc_{oss}$: Taux d'occupation des RdC (avec sous sol) 6 $0 \leq Trdc_{oss} \leq 1$	E_{oss} : Nombre d'étages (avec sous sol) en unité 14 $0 \leq E_{oss} \leq +\infty$
F_{oss} : Fonction de dommages (avec sous sol) en €/m² 7 $F_{oss} = 0.49.h + 113.4;$	
F_{ss} : Fonction de dommages (sans sous sol) en €/m² 8 $F_{ss} = 0.53.h + 102.1;$	

Cette méthode est utilisée par des organismes d'assurance malgré les limites problématiques de traduire une hauteur d'eau en unité monétaire, ici les €, selon une fonction de dommages.

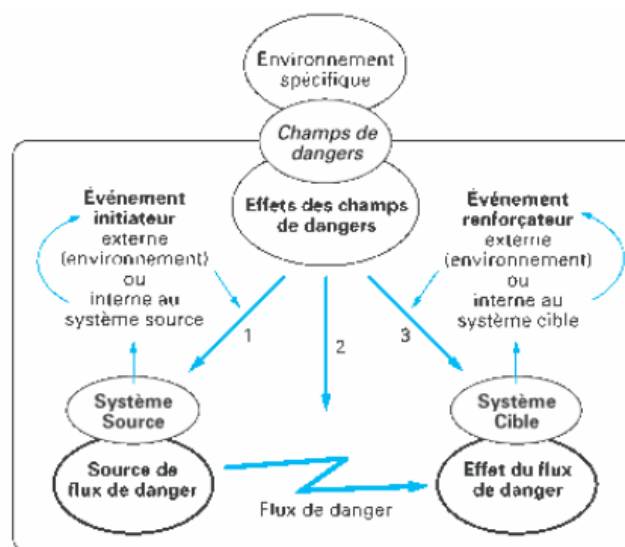
LE TRAITEMENT SYSTEMIQUE DE LA VULNERABILITE

Le principe général du traitement systémique de la vulnérabilité est de prendre en compte les interactions entre les différents sujets à la vulnérabilité, et plus généralement entre les objets de la ville. Il s'agit de comprendre la vulnérabilité en analysant les dysfonctionnements du système que représente la ville.

1. Principe général : modèle MADS

La Méthodologie d'Analyse de Dysfonctionnement des Systèmes est un outil construit selon les principes de la modélisation systémique, permettant de construire une analyse du risque. La méthode demande de définir deux systèmes en interaction, au sein d'un environnement actif : un système « source de danger » et un système « cible ». Les interactions entre ces deux systèmes peuvent être des échanges de flux de matières, d'énergie, d'informations, etc., et elles peuvent se réaliser dans le temps, dans l'espace...

La modélisation varie selon le cas d'étude. La définition des systèmes et de leurs interactions se fait selon le problème posé, leur structure, leur fonctionnement individuel et en lien avec l'environnement, ainsi que leur évolution.



Une application du modèle à l'étude de la vulnérabilité urbaine face à l'inondation, nous proposons les définitions suivantes des objets du modèle :

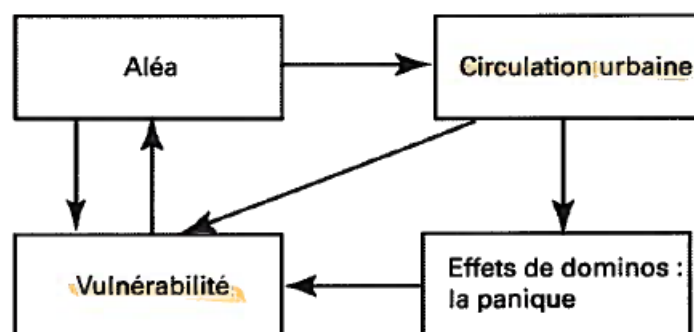
- Le flux de danger ou l'Événement Non Souhaité : **l'inondation (flux d'eau)**
- Le système cible sur lequel va agir le flux de danger : **population/bâti/réseaux/ organisations structurelles...** La rupture d'équilibre de ce système est l'effet du danger.
- Le système source de danger est ce qui produit le flux de danger : la mousson, le tsunami... **(système de l'aléa)**.
- Le champ de danger est l'ensemble des événements actifs agissant sur les systèmes.

- Les événements actifs : ensemble des indicateurs (présence d'un abri, efficacité des secours...)
 - Événements initiateurs : **la pluie, rupture de digue...**
 - Événements amplificateurs : renforçateur ou atténuateur, selon la valeur de l'indicateur (0 ou 1) : **matériaux de construction du bâti, préparation de la population au risque ...**

2. Traitement selon un diagramme Stocks-flux

Comme indiqué précédemment, la schématisation selon un modèle « Stock-flux » est utilisée par différents auteurs pour caractériser la vulnérabilité synthétique. Nous nous appuyerons ici essentiellement sur les travaux de D. PROVITOLO. Ses travaux soulignent que l'étude de la vulnérabilité doit intégrer l'aléa afin d'identifier au mieux le risque, sachant que celle-ci évolue en fonction de l'aléa. Il est également important de lier la vulnérabilité de l'Homme et celle du bâti, et d'étudier la vulnérabilité des réseaux de communication et la maîtrise des flux de circulation (pour l'évacuation, notamment). La vulnérabilité étant multifactorielle, il est difficile d'en obtenir une vision globale.

Les phénomènes étudiés étant rétroactifs, leur analyse doit dépasser l'étude des relations de causes à effets, la modélisation systémique est proposée pour répondre à cette problématique. La représentation systémique d'un aléa frappant un tissu urbain peut se traduire graphiquement selon le schéma suivant :

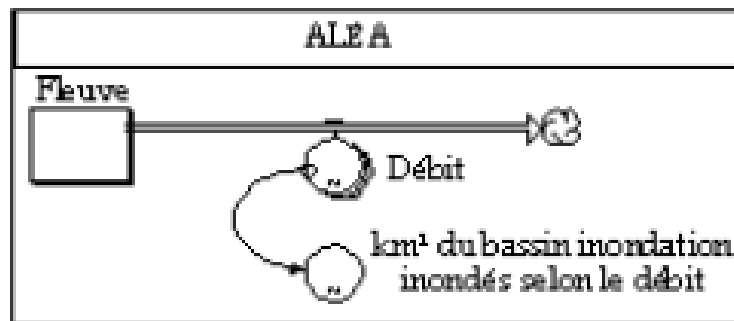


Dans son article « Vulnérabilité aux inondations méditerranéennes en milieu urbain : une nouvelle démarche géographique », Provitolo décompose les différents modules de ce système, en sous-systèmes qui seront rattachés pour une compréhension globale du risque. Chaque sous-système inclue des « éléments sujets » qui subissent les dommages et des « facteurs » qui impactent sur l'importance des dommages, et est relié aux autres sous-systèmes.

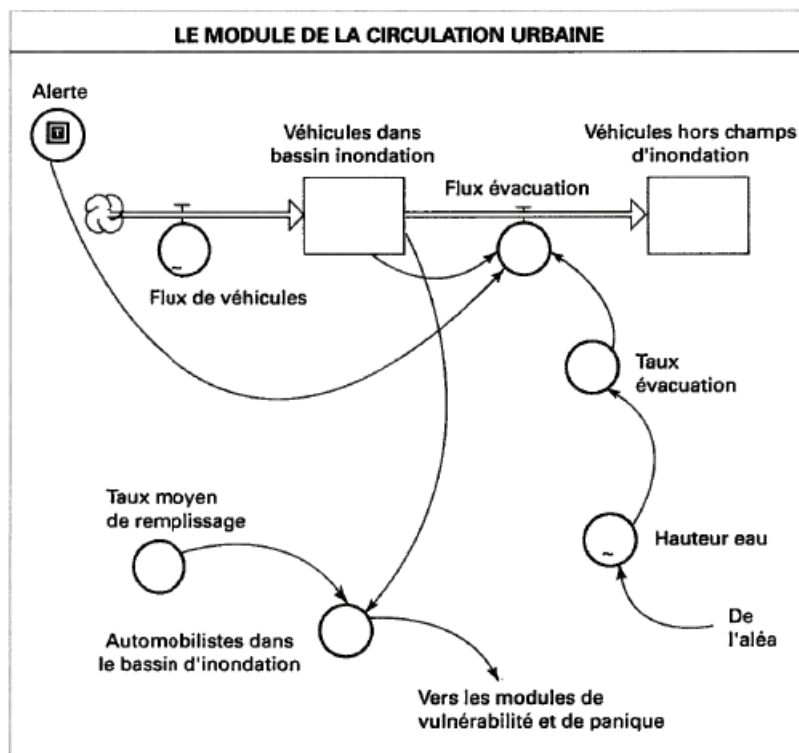
Par exemple le système décrivant la circulation urbaine permet de connaître la variabilité des flux de véhicules en fonction du temps, ainsi que les effectifs d'automobilistes présents dans la zone, pour ensuite l'intégrer au sous système de la vulnérabilité et celui de la panique. Mais ces variables dépendent elles-mêmes du système de l'aléa qui indique notamment la hauteur d'eau.

L'intérêt de cette approche est de décrire le système de vulnérabilité via des variables d'état, mais également d'introduire l'influence de certains paramètres sur le comportement du système. En effet, la mise en simulation de ces modèles permet de déterminer les conditions les plus favorables pour limiter les dégâts. Les variables d'état représentent des stocks qui sont alimentés ou vidés par les flux dépendant de variables auxiliaires, les facteurs amplificateurs ou atténuateurs.

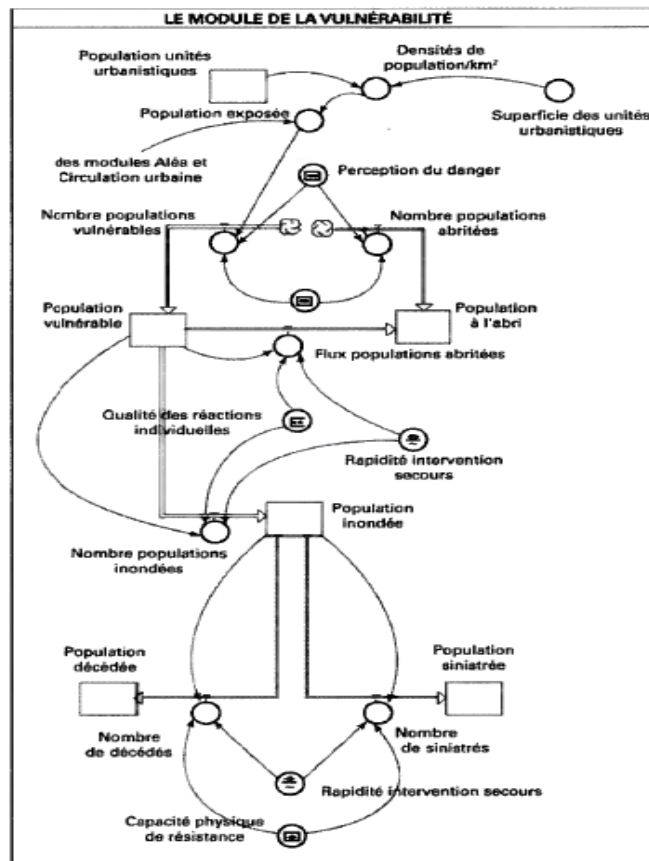
Pour la définition du système de l'aléa, l'auteure prend l'exemple d'une crue par débordement où le fleuve est variable d'état et son débit le flux.



Pour le module de la circulation urbaine, les variables d'état correspondent aux véhicules dedans/dehors de la zone touchée, et elles sont reliées par le flux d'évacuation. Ainsi, les véhicules exposés, et par conséquent les automobilistes, sont inclus dans le sous-système de la vulnérabilité.



Provitolo traite le module vulnérabilité par l'entrée « population ». Les variables d'état correspondent alors à la population vulnérable et celle à l'abri, ainsi qu'aux populations inondée, sinistrée et décédée.



La modélisation de la vulnérabilité en systèmes dynamiques permet d'établir la complémentarité entre les approches analytique et synthétique de celle-ci, et d'aboutir à un indice de perte ou de valeur des dommages estimés. De plus, le modèle est transposable pour traiter un aléa et/ou un territoire différent, en adaptant certains flux ou paramètres. L'intégration conjointe de l'aléa et de la vulnérabilité est un atout supplémentaire pour la compréhension du risque, puisque plus réaliste. Cependant, le modèle a aujourd'hui essentiellement une valeur explicative. Pour être intégré à la création d'outils de prévention et de gestion du risque, il est nécessaire de prendre en compte la spatialisation des variables d'état, qui n'est pour l'instant pas traitée.

3. Traitement statistique et spatial

Des auteurs ayant travaillé sur cette thématique, et en particulier les travaux de Samuel Rufat sur lesquels nous nous appuyons, proposent d'utiliser des indices de corrélations pour dégager les interactions entre les facteurs étudiés et ainsi définir des profils de vulnérabilité. Grâce aux matrices de corrélation des facteurs, il est possible de souligner les interactions positives qui renforcent la vulnérabilité au sein des unités spatiales ou au contraire les interactions négatives qui l'atténue.

Samuel Rufat propose une succession de méthodes et d'outils pour spatialiser les liens créateurs et amplificateurs de la vulnérabilité : « *Notre démarche commence par dégager des groupes de facteurs de vulnérabilité en veillant à leur équilibre et en étudiant leurs corrélations. Les variables retenues sont ensuite traitées par une analyse factorielle (Analyse en Composantes Principales normée), dont les axes servent de base à une classification automatique (CAH), qui débouche sur des typologies des unités spatiales qui seront cartographiées à l'aide d'un SIG* ». Contrairement à l'utilisation de modèles additifs, cette démarche permet de comparer les valeurs obtenues pour les unités spatiales à celle d'un profil d'îlot moyen, et de représenter graphiquement ces écarts. L'association des profils de vulnérabilité et leur spatialisation, mais aussi de la cartographie de l'aléa, met en lumière les interactions et le renforcement de la vulnérabilité.

Les facteurs de vulnérabilité les plus souvent cités dans des publications sont :

- La densité
- La population de moins de 10 ans
- La population de plus de 75 ans
- L'absence de viabilité des logements
- Les caractéristiques des bâtiments les moins résistants.

Le dernier facteur est dépendant du territoire d'étude, de son urbanisation et de son histoire. Pour les pays émergents le développement important de l'habitat informel et les caractéristiques du bâti qui lui sont associés sont à intégrer à ces facteurs. En effet, l'occupation spontanée des espaces urbains limite la réflexion globale de l'aménagement planifié d'un territoire prenant en compte la pérennité de l'habitat, la mobilité, des réseaux efficaces... De plus ces quartiers informels sont souvent révélateurs d'une forte pauvreté se traduisant dans la construction de l'habitat, la vulnérabilité de la population, l'absence de viabilité...

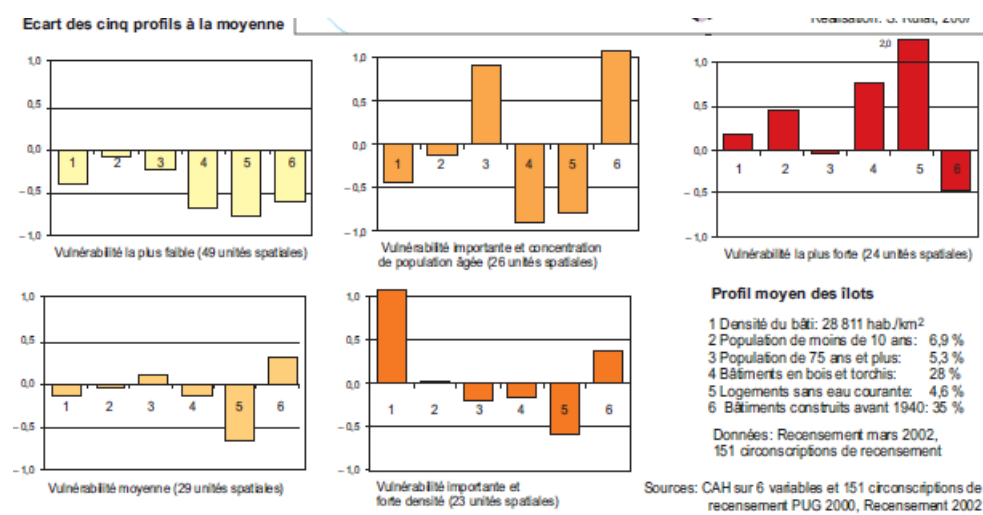
En ce qui le concerne, Samuel Rufat a appliqué cette méthode pour la ville de Bucarest. Les données statistiques inhérentes aux principaux facteurs énoncés ci-dessus collectées lors d'un recensement en 2012 de la ville, lui ont permis de calculer les indices de corrélations de ces variables. Il aboutit ainsi aux résultats suivants :

densité	1					
moins de 10 ans	0,10	1				
plus de 75 ans	-0,33	-0,32	1			
bois et torchis	0,23	0,55	-0,29	1		
construction avant 1940	-0,18	-0,28	0,12	-0,22	1	
sans eau courante	0,11	0,59	-0,10	0,62	-0,15	1
	densité	moins de 10 ans	plus de 75 ans	bois et torchis	construction avant 1940	sans eau courante

Tableau 1. Corrélations entre les variables le plus souvent utilisées comme facteur de vulnérabilité
(en gras, les coefficients de corrélation significatifs au seuil de 1%)

On observe ici une forte corrélation entre les constructions en bois et torchis et celles sans eau courante, cela signifie statistiquement que ces bâtiments disposent d'une distribution similaire. Cet exercice permet notamment de réduire le nombre de variables pour une analyse, dans notre cas de la vulnérabilité d'une unité spatiale.

La sélection restreinte d'indicateurs selon cette méthode, permet par la suite un traitement statistique combinant une Analyse en Composantes Principales⁹ (ACP) et une classification automatique¹⁰ (CAH). Cette démarche aboutit à la définition d'un profil moyen de vulnérabilité et un nombre déterminé de profils en comparaison à ce dernier. Pour le cas de Bucarest, Samuel Rufat avait obtenu avec cette méthode 5 profils basés sur les valeurs des 6 indicateurs précédents.

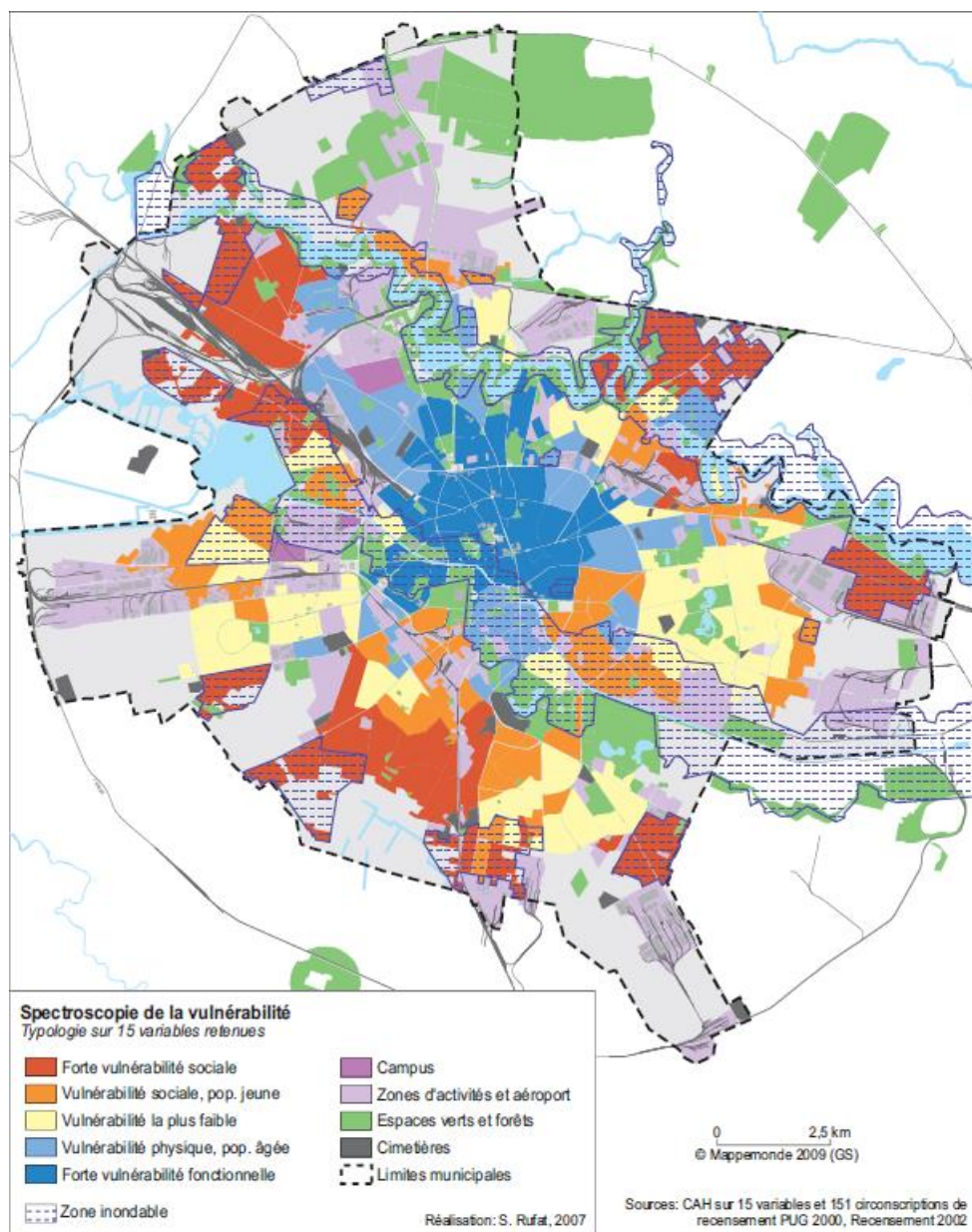


De plus l'utilisation d'un SIG permettant d'intégrer des données de natures et de sources variables, il est possible par le biais de cet outil de mettre en avant les interactions amplificatrices de la vulnérabilité et de modéliser des scénarios. La collecte des données et qui plus est « de qualité » peut

⁹ Méthode factorielle de réduction de dimension pour l'exploration statistique de données quantitatives complexes. Représentations graphiques des individus.

¹⁰ La classification ascendante hiérarchique (CAH) est une méthode de classification itérative basée sur les dissimilarités.

s'avérer compliqué et représenter un réel frein à l'analyse de la vulnérabilité. Comme nous l'avons vu tout du long de l'étude, cette réalité est particulièrement présente lorsqu'il s'agit de villes situées dans des pays émergents. Pour son cas d'étude, Rufat a pu s'appuyer sur les données « les données les plus fiables et complètes disponibles » et grâce à un SIG intégrer l'aléa, les bâtiments à enjeux et les réseaux à l'analyse : *« Les infrastructures ont été réparties en 6 classes, selon le type et l'horaire de fréquentation : institutions, infrastructures de santé, d'éducation, sportives, culturelles et commerciales. Les réseaux de transport et de viabilité (eau potable, évacuation, électricité, gaz) ont été transformés en informations zonales en s'appuyant sur le recensement (connexion des logements) et en additionnant les nœuds (nombre de montées descentes dans les gares, stations, etc.) par circonscription de recensement. »*



La difficile définition d'unités spatiales et l'approximation, voire parfois l'absence, des données sont les 2 principales limites de cette méthode, en particulier dans des pays où les moyens (financiers, techniques...) et/ou la volonté de collecter des données exploitables manque(nt). La démarche a cependant le mérite d'aider à la gestion de crise, avec la réalisation d'un ordonnancement de

l'évacuation par exemple, en adoptant successivement visions analytique et synthétique, et en aboutissant à une synthèse visuelle des interactions créatrices et amplificatrices de la vulnérabilité.

CONCLUSION

La première partie de notre Projet de Fin d'Etudes nous a permis d'appréhender la notion de vulnérabilité urbaine et des méthodes entreprises pour l'estimer. La seconde consistera à mettre en application les méthodes précédemment vues à Chennai, en Inde, en faisant face aux spécificités et à la réalité des pays émergents.

Les recherches sur la compréhension et l'estimation de la vulnérabilité urbaines sont permanentes. Les deux approches présentées ont leurs avantages et leurs inconvénients pour une application dans les pays émergents. :

- La première propose une vision partielle s'appuyant sur des données nombreuses qui peuvent être difficiles à collecter.
- La seconde présente une explication globale de la vulnérabilité, sans toutefois prendre en compte la spatialisation des variables qui peuvent être nombreuses.

Face à ces constats nous proposons un compromis pour estimer la vulnérabilité des quartiers de Chennai face à l'inondation. La méthode envisagée s'appuie sur les travaux de S. Rufat, il s'agirait de choisir un panel d'indicateurs touchant les différents sujets de la vulnérabilité sectorielle et d'étudier leurs corrélations afin de sélectionner les plus pertinents et ainsi réduire leur nombre. Le traitement statistique des indicateurs sélectionnés permettrait ainsi de définir des profils de vulnérabilité pour les différents quartiers de la ville de Chennai.

Nous avons toutefois conscience que cette méthode est théorique et qu'elle pourra être amenée à évoluer, être adaptée... en fonction des éventuelles difficultés rencontrées sur le terrain.

LEXIQUE

ALEA : Phénomène à risque d'occurrence et d'intensité données.

ANALYSE MULTICRITERE : Méthode d'analyse ayant pour but l'identification et la définition de chaque critère préalablement défini.

ANALYSE SECTORIELLE : Etude des différents secteurs du domaine traité.

ANALYTIQUE : Description d'un ensemble ou système en le décomposant pour l'analyser.

ENJEUX : Ensemble de biens, personnes, activités, moyen, patrimoines, susceptibles d'être affectés par un phénomène.

ENVIRONNEMENT : Ensemble des éléments objectifs et subjectifs entourant le système en question.

FLOODPLAIN MANAGEMENT : Gestion et étude de zones inondables.

INDICATEUR : Grandeur spécifique observable et mesurable servant à montrer les changements obtenus en vue de la réalisation d'un effet spécifique. L'indicateur doit être focalisé, clair et spécifique.

INDICE : Nombre permettant de résumer et de caractériser la variation relative d'une grandeur simple ou complexe entre deux situations.

INONDATION : Submersion temporaire, naturelle ou artificielle, d'un espace par de l'eau liquide.

RESILIENCE : Capacité d'un système à absorber une perturbation, à se réorganiser et à continuer de fonctionner de la même manière qu'avant la survenance de cette perturbation.

RISQUE : Possibilité, probabilité d'un fait, d'un événement considéré comme un potentiel de mal ou dommage.

SYNTHETIQUE : Par opposition à analytique, description d'un ensemble.

SYSTEMIQUE : Approche scientifique d'un système en s'opposant à la démarche rationaliste en abordant tout problème comme un ensemble d'éléments en relations mutuelles.

VULNERABILITE : Est le caractère de ce qui est vulnérable, fragile, précaire, de ce qui peut être endommagé, attaqué, blessé. Ce terme ici s'applique à des systèmes qui sont fragiles face des événements climatiques, socio-économiques, naturels.

VULNERABILITE SOCIALE : Fragilité morale ou matérielle à laquelle est exposé un individu, une organisation ou une société.

BIBLIOGRAPHIE

ADGER W. NEIL. GLOBAL ENVIRONMENTAL CHANGE : VULNERABILITY. ELSEVIER, 2006. 281 p.

BARROCA BRUNO ET AL. DE LA VULNERABILITE A LA RESILIENCE : MUTATION ET BOULEVERSEMENT. SUR LE CHAMP/SUR LE TERRAIN. POLITIQUES ET PRATIQUES DE LA RESILIENCE. ECHOGeo 2013. [2017]

BASCOPE RENE, ANALYSE MULTICRITERE POUR L'EVALUATION DE LA VULNERABILITE TERRITORIALE AUX SEISMES : L'EXEMPLE DE MENDOZA, ARGENTINE. MILIEUX ET CHANGEMENTS GLOBAUX. HAL, 2015. [2017].

BLAIKIE PIERS, CANNON TERRY, DAVIS IAN ET WISNER BEN. AT RISK : SECOND EDITION, NATURAL HAZARDS, PEOPLE'S VULNERABILITY AND DISASTERS. PNUD 2003.[2017].

CHARDON ANNE-CATHERINE. ETUDE INTEGREE DE LA VULNERABILITE DE LA VILLE DE MANIZALES (COLOMBIE) AUX RISQUES NATURELS. IN : REVUE DE GEOGRAPHIE ALPINE, TOME 82, N°4, 1994. PP. 97-111.

DAUPHINE ANDRE ET AL. ANNALES DE GEOGRAPHIE N°654 : LA RESILIENCE : UN CONCEPT POUR LA GESTION DES RISQUES. ARMAND COLIN, 2004. 112 p.

D'ERCOLE ROBERT ET AL. VULNERABILITES URBAINES DANS LES PAYS DU SUD.CNRS-UMR, 2009. [2017].

DURAND DOMINIQUE. REACTIVITY AND GELATION. I. INTRINSIC REACTIVITY. WILEY PERIODICAL, 1979. 273-294 p.

ELEUTERIO JULIAN ET AL. INGENIERIES N°55-56 : SENSIBILITE DE L'EVALUATION DES DOMMAGES ASSOCIES AUX INONDATIONS EN FONCTION DE LA CARACTERISATION DE LA VULNERABILITE DES BATIMENTS. 2008. 29-44 p.

FABIANI JEANS-LOUIS, JACQUES THEYS. LA SOCIÉTÉ VULNÉRABLE : ÉVALUER ET MAITRISER LES RISQUES. 1987. 678 p.

ELEUTERIO JULIAN, ANNE ROZAN, SYLVAIN PAYRAUDEAU. SENSIBILITE DE L'EVALUATION DES DOMMAGES POTENTIELS LIES AUX INONDATIONS. 2009.

LEFORT E. ET AL. ÉVALUATION DES VULNERABILITES AUX INONDATIONS DANS LE CADRE DE LA GESTION OPERATIONNELLE DES RISQUES ET DU DEVELOPPEMENT LOCAL : APPLICATION AU BASSIN VERSANT DE L'ORGE AVAL. MEMOIRE DE DEA SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'ENVIRONNEMENT. 2004.

PARKER D., "FLOODPLAIN DEVELOPMENT POLICY IN ENGLAND AND WALES", APPLIED GEOGRAPHY, VOL. 15, N°4, PP. 341-363, 1995.

PARKER D ET AL. DELIVERABLE 2.1. RELATIONS BETWEEN DIFFERENT TYPES OF SOCIAL AND ECONOMIC VULNERABILITY. NATURAL HAZARDS, 2009.

PERRAULT MATTHIEU. EVALUATION DE LA VULNERABILITE SISMIQUE DE BATIMENTS A PARTIR DE MESURES IN SITU. SCIENCES DE LA TERRE. UNIVERSITE DE GRENOBLE, 2013.

PERROW CHARLES. NORMAL ACCIDENTS : LIVING WITH HIGH-RISK TECHNOLOGIES. UPDATED EDITION, 1984. 464 p.

PROVITOLO DAMIENNE. LA VULNERABILITE RESILIENTIAIRE : UN CADRE D'ANALYSE DES SYSTEMES FACE AUX RISQUES ET CATASTROPHES. 2010.

QUENAULT BEATRICE. LA VULNERABILITE, UN CONCEPT CENTRAL DE L'ANALYSE DES RISQUES URBAINS EN LIEN AVEC LE CHANGEMENT CLIMATIQUE. LES ANNALES DE LA RECHERCHE URBAINE. PUCA, 2015.

RUFAT SAMUEL. ESTIMATION RELATIVE DE LA VULNERABILITE URBAINE A BUCAREST. 2009

THOURET JEAN-CLAUDE, D'ERCOLE R. VULNERABILITE AUX RISQUES NATURELS EN MILIEU URBAIN : EFFETS, FACTEURS ET REPONSES SOCIALES. IN. THOURET JEAN-CLAUDE (PREF.). CROISSANCE URBAINE ET RISQUES NATURELS DANS LES PAYS EN DEVELOPPEMENT. CAHIERS DES SCIENCES HUMAINES. CLERMOND FERRAND : IRD, 1996. 407-422 P.

(4 ème de Couverture)

CITERES

*UMR 7324
Cités, Territoires,
Environnement et
Sociétés*

*Equipe IPA-PE
Ingénierie du Projet
d'Aménagement,
Paysage,
Environnement*



35 allée Ferdinand de Lesseps

BP 30553

37205 TOURS cedex 3

Directeur de recherche :

VERDELLI Laura

FOREAU Clémence

GUESDON Sébastien

Projet de Fin d'Etudes

DA5

2017/2018

RESUME

Ce projet de fin d'études a pour intention de présenter l'évolution de l'évaluation de la vulnérabilité au fil du temps et les différentes méthodes utilisées pour ce faire. Il va expliquer pourquoi l'étude de la vulnérabilité est si importante, ce qui la rend compliquée et pourquoi la gestion du risque est inégalitaire entre les territoires. Ce travail propose différentes méthodes pour l'estimation et le calcul de la vulnérabilité, son lien avec l'aléa et comment ils forment le risque. Il montre, au travers de cartes et de systèmes logiques la possible généralisation des méthodes établies et les cas dans lesquelles elles sont utilisées. Les éléments nécessaires à la mise en place de cette méthodologie, ainsi qu'à sa cartographie sont présentés. Le résultat final s'exprime par l'exposition des différentes méthodes expérimentables sur le cas de la ville de Chennai en Inde ainsi que les limites de transcription de ces méthodes sur les pays en voie de développement.

MOTS CLES

Vulnérabilité urbaine, Risque inondation, Approche analytique, Approche systémique