Modélisation d'indicateurs de résilience urbaine face au risque d'inondation : co-construction d'un système spatial à la décision pour contribuer à l'opérationnalisation du concept de résilience

Charlotte Heinzlef

▶ **To cite this version:**

Charlotte Heinzlef. Modélisation d'indicateurs de résilience urbaine face au risque d'inondation : co-construction d'un système spatial à la décision pour contribuer à l'opérationnalisation du concept de résilience. Etudes de l'environnement. Université d'Avignon; Université de Mons (Belgique), 2019. Français. ⟨NNT : 2019AVIG1197⟩. ⟨tel-02893161⟩

HAL Id: tel-02893161

https://theses.hal.science/tel-02893161v1

Submitted on 8 Jul 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

HAL Authorization

THÈSE DE DOCTORAT D'AVIGNON UNIVERSITÉ
École Doctorale 537 Culture et Patrimoine
UMR ESPACE

Spécialité :
Géographie

THÈSE DE DOCTORAT DE LA FACULTE D'ARCHITECTURE ET D'URBANISME DE MONS
Service Projets, Ville et Territoire

Spécialité :
Art de Bâtir et Urbanisme

Présentée par
Charlotte Heinzlef

Modélisation d'indicateurs de résilience urbaine face au risque d'inondation

Co-construction d'un système spatial d'aide à la décision pour contribuer à l'opérationnalisation du concept de résilience

---

Soutenue publiquement le 04/12/2019 devant le jury composé de :

Bruno Barroca **Rapporteur**
Vincent Becue **Co-Directeur de Thèse**
Corinne Curt **Examinatrice**
François Ganz **Membre Invité**
Willy Lahaye **Examinateur**
Myriam Merad **Rapporteure**
Damien Serre **Directeur de Thèse**
Jean-Paul Vanderlinden **Examinateur et Président du Jury**

Résumé

Dans un contexte de dérèglement climatique, d'augmentation des inondations en milieu urbain, d'augmentation des incertitudes, les gestionnaires urbains sont obligés d'innover pour concevoir des stratégies de gestion des risques adéquates. Parmi ces stratégies, rendre les villes résilientes est devenu un impératif. Le concept de résilience est un concept pluridisciplinaire qui définit la capacité d'un système à absorber une perturbation et à récupérer ses fonctions par la suite. Cette notion renvoie à une innovation technique, urbaine, sociale, architecturale, économique et politique et enjoint à une remise en question des stratégies traditionnelles de gestion du risque. Cette injonction à l'innovation s'adapte parfaitement à la complexité urbaine, économique, politique, sociale, écologique du monde contemporain. De ce fait, le concept de résilience s'intègre aux enjeux d'étalement urbain et aux risques associés. Pourtant, malgré cette adéquation théorique et conceptuelle, la résilience demeure complexe à intégrer dans les pratiques des urbanistes et acteurs territoriaux. Sa multitude de définitions et d'approches a favorisé son abstraction et son manque d'opérationnalisation.

Face à ce constat, cette recherche se propose de répondre à ces lacunes opérationnelles en construisant un système spatial d'aide à la décision afin de clarifier et favoriser l'intégration du concept dans les pratiques urbaines. L'idée défendue est que la résilience urbaine incarne les aptitudes et capacités d'une ville et de sa population à mettre en place avant, pendant et après un événement perturbateur de façon à en limiter les impacts négatifs. Ce positionnement scientifique permet donc d'analyser la résilience urbaine sur un long pas de temps, mettant en avant des capacités proactives que le système urbain doit développer de façon à (ré) agir face à l'inondation. Ce travail s'est appuyé sur un partenariat socio-économique avec la Ville d'Avignon et son Service SIG (Système d'Information Géographique). L'approche a permis de construire trois indicateurs de mesure afin d'aborder la résilience urbaine, technique et social. Ces indicateurs ont permis d'acquérir des informations sur les variables définissant des potentiels de résilience qui favoriseraient l'émergence d'une réponse adéquate face à une inondation urbaine. L'utilisation de techniques de géovisualisation a permis de favoriser la visualisation des traitements et des résultats afin d'expliciter la démarche auprès des gestionnaires urbains. Parallèlement, des ateliers de concertation ont été montés afin de présenter et discuter des résultats obtenus grâce aux indicateurs avec les responsables et gestionnaires des infrastructures critiques.

La co-construction de ces indicateurs, afin de construire une analyse et une connaissance autour de la résilience urbaine, suivis de la mise en place d'ateliers avec les acteurs du territoire, afin de favoriser le processus décisionnel territorial, a permis de développer une culture de résilience. Ce système spatial d'aide à la décision a donc permis la mutualisation des connaissances théoriques et pratiques autour des questions de risques urbains et de résilience afin de parvenir à un consensus nécessaire pour la prise de décision et l'opérationnalisation de la résilience.

Mots clefs : Résilience, inondations urbaines, système spatial d'aide à la décision, approche collaborative, gestion des risques, changement climatique

Abstract

In a context of climate change, increased urban flooding and increased uncertainty, urban managers are forced to innovate to design appropriate risk management strategies. Among these strategies, making cities resilient has become an imperative. The concept of resilience is a multidisciplinary concept that defines the ability of a system to absorb a disturbance and then recover its functions. This concept refers to technical, urban, social, architectural, architectural, economic and political innovation and calls into question traditional risk management systems. This injunction to innovation is perfectly adapted to the urban, economic, political, social and ecological complexity of the contemporary world. As a result, the concept of resilience is integrated with urban sprawl issues and associated risks. However, despite this theoretical and conceptual adequacy, resilience remains complex to integrate into the practices of urban planners and territorial actors. Its multitude of definitions and approaches have contributed to its abstraction and lack of operationalization.

In response to this observation, this research aims to address these operational gaps by building a spatial decision support system to clarify and promote the integration of the concept into urban practices. The idea behind this approach is that urban resilience embodies the abilities and capacities of a city and its population to develop before, during and after a disruptive event in order to limit its negative impacts. This scientific positioning therefore makes it possible to analyze urban resilience as a continuum, highlighting proactive capacities that the urban system must develop in order to (re)act in the face of flooding. This work was based on a socio-economic partnership with the City of Avignon and its GIS Service (Geographic Information System). The approach made it possible to build three measurement indicators to address the urban, technical and social resilience of the Avignon area. These indicators have made it possible to acquire information on the variables defining potential resilience that would foster the emergence of an adequate response to a natural disaster and more precisely to an urban flood. The use of geovisualization techniques has made it possible to visualize treatments and results in order to explain the approach to urban managers. At the same time, consultation workshops were held to present and discuss the results obtained through the indicators with critical infrastructure managers and managers.

The co-construction of these indicators, in order to build an analysis and knowledge around urban resilience, followed by the implementation of workshops with stakeholders in the territory, in order to promote the territorial decision-making process, has made it possible to develop a culture of resilience. This spatial decision support system has therefore made it possible to pool theoretical and practical knowledge on urban risk and resilience issues in order to reach the consensus necessary for decision-making and the operationalization of resilience.

Key words: Resilience, urban floods, spatial decision support system, collaborative approach, risk management, climate change

Remerciements

Je remercie tous les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail et de participer à la soutenance : Myriam Merad, Directrice de recherche CNRS à Paris Dauphine et rapporteure ; Bruno Barroca, maître de conférence à Paris Est Marne-La-Vallée et rapporteur ; Corinne Curt, ingénieure de recherche à IRSTEA Aix-en-Provence et examinatrice, Willy Lahaye, professeur de psychologie à l'UMONS et examinateur ; et Jean-Paul Vanderlinden, professeur d'économie à l'Université Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines et examinateur.

Je remercie la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur pour le financement de cette thèse. Merci au Cluster SAFE pour avoir labellisé ce projet de recherche et avoir cru en ce travail. Merci à la Ville d'Avignon pour avoir accepté un partenariat socio-économique et merci au Service SIG pour son soutien technique et théorique.

Je remercie l'UMR ESPACE (7300 CNRS) pour ces deux années passées dans les locaux. Merci à l'équipe et plus particulièrement à Nathalie Brachet pour son aide administrative et technique !

Merci infiniment à la Faculté d'Architecture et d'Urbanisme de Mons pour cette co-tutelle, la découverte de l'Architecture, les conférences organisées (01 Design 11), les opportunités (Ma Thèse en 180 secondes), et les moments chaleureux de partage avec toute l'équipe (je pense notamment au Doudou !).

Après trois (intenses) années de thèse, la première pensée est l'étonnement d'avoir survécu. Et pourtant, je m'imaginais me transformer en la doctorante de mes cauchemars, de la poussière et des toiles d'araignées s'accumulant autour de moi… Mais si j'ai survécu, et en gardant le sourire, c'est bien grâce à toutes les personnes extraordinaires qui m'entourent depuis des mois et des années.

Je ne sais pas comment exprimer toute ma gratitude à Damien Serre, mon directeur de thèse. Depuis le début tu as cru en moi, et ce malgré le malencontreux verre de vin renversé sur toi. Comme quoi… Merci de m'avoir permis de relever ce défi professionnel et tellement personnel. Merci pour ton soutien sans faille ! Sans toi, tes coups de pieds aux fesses quand c'était nécessaire ou tes « Ti punch » d'encouragement pour me remonter le moral, je n'en serais pas là aujourd'hui ! Merci de m'avoir poussé dans mes retranchements, de m'avoir poussé à toujours faire plus, à donner plus. Merci pour ces trois années, et merci pour tous ces fantastiques projets à monter ensemble ! Merci pour ton encadrement mais surtout merci pour ton amitié !

Merci à Vincent Becue, mon co-directeur. Merci de m'avoir intégré à la FAU ! Grâce à toi j'ai découvert la Belgique et ses bières ! Ta gentillesse, nos « réunions » d'avancement sur la Grande Place de Mons, ton initiation au Doudou, m'ont permis de trouver ma place en Belgique avec des gens incroyables !

Merci également à François Ganz, responsable du service SIG de la ville d'Avignon. Sans toi, cette thèse n'aurait pas eu les mêmes résultats ! Merci pour ton aide technique et surtout pour ta présence

au cours de ces trois années, ton écoute et tes encouragements ! Merci d'avoir partagé cette expérience avec moi !

Survivre à son travail de recherche c'est aussi des moments où l'on se plaint de sa thèse ! Pour cela, merci aux doctorants d'Avignon : Laurianne, Mika, Romain, Quentin, Esteban, Rémi. Merci pour les barbecues, les apéros, les matchs et pour tous ces moments « off ». Une spéciale dédicace à Béa, merci pour tous tes encouragements, ton soutien, ton dynamisme, ta positivité sans faille et les retrouvailles autour de bouteilles de vin !

Merci à ma famille belge, Iman, Marceline et Anis. Les filles, sans vous cette année belge n'aurait pas eu autant de saveur ! Merci pour ces papotages entre bureaux (certains ont dû nous en vouloir), l'amour partagé pour les plantes et IKEA®, les câlins dans les moments difficiles et votre optimisme sans faille ! Tenez bon, on en sort vivant ! Anis, merci pour ta gentillesse et toutes nos pauses café/goûter !

Une thèse ce n'est pas seulement un travail de trois années, mais un aboutissement de toutes les années et apprentissages passés. Merci à tous mes amis, anciens et nouveaux pour m'avoir accompagné dans ce long cheminement.

Lionel, toi qui es là depuis le début, merci pour ton écoute, tes encouragements, le chachampagne, tous nos potins partagés ! Qui nous aurait dit qu'on en arriverait là, après les souvenirs inoubliables des cours d'italien en seconde ! Merci de m'avoir remonté le moral tant de fois, et d'avoir cru en moi !

Louise, on ne s'est plus lâchées depuis la Khâgne ! Entre Paris, Venise, Versailles, les Mureaux notre amitié n'a pas pris une ride ! Merci d'être toi ! Je t'attends de pieds ferme à Tahiti et j'ai hâte de pouvoir fêter aussi ta soutenance !

Juliette, je sais j'avais pourtant bien dit « jamais je ne ferai une thèse ». No comment ! Sans doute nos stages de terrain en L3 de Géographie qui auront fini par me convaincre !

Maja, nos moments partagés à Avignon, notre « colocation améliorée », notre investissement dans SOS Méditerranée et notre conférence, les allers-retours entre la France et l'Allemagne et enfin la naissance de ton petit bout auront marqué ces trois années ! Tellement hâte de te retrouver pour un petit week-end à Brême, des goûters au chaud et des papotages jusqu'au bout de la nuit !

Thomaaaas ! Alalala cette colocation belge ! Ta voix cristalline dans la douche, ta définition assez discutable de la cuisine, nos films partagés, tes anniversaires, les raclettes, les apéros du lundi soir me manquent tous les jours ! Après Mons, Paris, Versailles et Avignon, je t'attends maintenant à l'autre bout du monde !

Marina et Ségolène, merci d'avoir rendu cette dernière année de thèse si belle ! Qu'est-ce que ces moments à débattre sur la vie me manquent ! Hâte de vous retrouver à Avignon ou en Suisse !

A ma famille, merci d'être là depuis le début et pour toujours ! Je vous aime plus que tout ! Si je suis parvenue à aller au bout de cette aventure, c'est bien grâce à vous ! Merci d'être la meilleure famille qu'on puisse rêver d'avoir !

Antoine, Juliette et Violette, merci de me laisser être votre grande sœur ! Merci de m'avoir rappelé qu'il n'y avait pas que la thèse dans la vie, merci pour nos sorties, nos disputes, les heures passées devant les Sims®, merci d'être follement vous !

Papa, que de chemin depuis les histoires de Bilbo le Hobbit ! Malgré le temps qui passe, je reste et resterai toujours ta Oua ! Tes goûters d'amour, nos meetings secrets, nos conciliabules, tout me manque ! J'ai tellement hâte qu'on se retrouve tous pour que tu aies tous tes petits poussins autour de toi !

Maman…. Que dire… Tu es là depuis toujours et tu as fait de moi la jeune femme que je suis aujourd'hui. Merci de me pousser toujours plus loin ! Sans tes phrases « ce n'est pas méchant, c'est vrai », sans ton exigence et ton soutien, sans ton amour, je n'en serais pas là aujourd'hui ! Merci d'accepter mon absence depuis aussi longtemps… Tu me manques ! Merci d'être ma maman, mais plus que tout, merci d'être ma meilleure amie !

Liste des Figures

Figure 1 : Rues inondées après la tempête Xynthia ©Bertrand Guay ……..16

Figure 2 : Enjeux de la gestion des risques……...17

Figure 3 : Quantification du nombre de catastrophes sur la période 1995-2015, (UNISDR and CRED, 2015)……19

Figure 4 : Population totale localisée dans des zones soumises à des risques climatiques, (Institute for Economics and Peace, 2019)……20

Figure 1 : Variation régionale du niveau de la mer pour RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 en mètres pour les variations du niveau de la mer. La colonne de gauche illustre la tranche de temps 2046-2065 et la colonne de droite 2081-2100 (IPCC, 2019)……...21

Figure 2 : Nombre de personnes affectées par types de catastrophes sur la période 1998-2017 à l'échelle mondiale (Heinzlef, 2019)……22

Figure 3: Part par type de catastrophe en 2018 (Cred Crunch, 2019)……23

Figure 4 : Les 10 premiers pays/territoires en termes de pertes absolues (milliards de dollars US) 1998-2017, (Wallemacq and House, 2018)……24

Figure 5 : Nombre d'inondations fluviales entre 1980 et 2015 dans les pays membres de l'Espace Économique Européen, (European Environment Agency, 2017)……..25

Figure 6 : Évolutions prévues des inondations de rivières avec une période de récurrence de 100 ans, au début (à gauche), à la moitié (au centre), et à la fin (à droite) du XXIe siècle, (European Environment Agency, 2017)……..26

Figure 7 : Part de la population et logements situés en zone inondable, © SOeS, 2012 – Dreal, 2012 – Insee, RFL 2009 et RP 2008 - ©IGN, Contours Iris®, 2008 - ©IGN, BD Carto®, 2008……..27

Figure 8 : Communes soumises au risque inondation en Région Provence Alpes Côte d'Azur © CYPRES 2012…….28

Figure 9 : Zones inondables dans le Vaucluse, ©DIREN PACA /IGN Geofla……...29

Figure 10 : Carte mondiale montrant l'emplacement des agglomérations urbaines de plus de 750 000 habitants en 1950 (d'après les statistiques de la Division de la population du DAES, 2012, (GIEC, 2014b)……..32

Figure 11 : Carte mondiale montrant l'emplacement des agglomérations urbaines de plus de 750 000 habitants en 2025 (d'après les statistiques de la Division de la population du DAES, 2012), (GIEC, 2014b)……..32

Figure 12 : Projections des aires urbaines 1970-2030 (United Nations, 2018)……33

Figure 13 : La tempête Xynthia causant la destruction des digues en 2010 ©Philippe Chere……...35

Figure 14 : Exemple d'interdépendance entre différents réseaux en milieu urbain (Serre et al., 2016)……..37

Figure 15 : Représentation visuelle des effets dominos : une trajectoire linéaire des événements en cas de catastrophe et une trajectoire en cascade, avec l'amplification et les événements secondaires (Pescaroli and Alexander, 2015)……..38

Figure 16 : Inondations à la Nouvelle Orléans (Cotelle, 2014)……..39

Figure 17 : Coûts des dommages directs causés par l'ouragan Sandy (Kunz et al., 2013)……..40

Figure 18 : Évolution de la gestion des risques……..42

Figure 19 : Séisme de Lisbonne en 1755 ©Geostrategia……..43

Figure 20 : Vue des digues à Saint-Martin-de-Ré après le passage de Xyntia ©AFP Xavier Leoty……..44

Figure 21 : Résilience vs vulnérabilité (Heinzlef, 2019)……..48

Figure 22 : Apports et limites du concept de résilience……49

Figure 27 : Les différents domaines d'utilisation de la résilience (Lhomme et al., 2010)……..56

Figure 28 : Modèle de Panarchy de Gunderson et Holling (Chelleri, 2012)……..60

Figure 29 : La vulnérabilité résiliençiaire (Provitolo, 2009)……64

Figure 30 : Le processus de résilience (Serre, 2011)……65

Figure 31 : Modélisation simplifiée du système urbain (Lhomme et al., 2010)……68

Figure 32 : Interactions entre les différents éléments et échelles spatiales d'un territoire urbain (Toubin, 2014)……..69

Figure 33 : L'approche intégrée du projet FloodResilienCity (Serre, 2011)……..72

Figure 34 : Conception du quartier Zolhlafen (Balsells, 2015)……..73

Figure 35 : Exemple du quartier « résilient », HafenCity, Hambourg, Allemagne (collection personnelle)……..74

Figure 36 : L'Elbphilharmonie de Hambourg © Maxim Schulz……...74

Figure 37 : Quartier Matra ©Libération 27/06/2016……75

Figure 238 : Quartier Matra. Conception du quartier en temps sec et en situation d'inondation (Daniel-Lacombe, 2012)…….75

Figure 39 : Schématisation simplifiée de la construction d'indicateurs……77

Figure 240 : Interrelations entre les indicateurs, les données et les objectifs finaux (Birkmann, 2006)……..78

Figure 41 : Les indicateurs Leaken (Jean et al., 2019)……..81

Figure 42 : Vulnérabilité sociale 1980-2010 à l'échelle des USA (Cutter and Finch, 2008)……..83

Figure 43 : Cartographie de la vulnérabilité aux USA à l'aide du SVI (Bakkensen et al., 2017)……...84

Figure 44 : Cartographie du PhyVI à Trondheim (Rød et al., 2012)……..85

Figure 425 : Variable du SoVI utilisées à Trondheim (Rød et al., 2012)……86

Figure 426 : L'IntVI à Trondheim (Rød et al., 2012)……86

Figure 47 : Cartographie de la vulnérabilité à Perth. Ce scénario permet de visualiser la vulnérabilité des districts les zones lorsque les dommages corporels et les dommages résidentiels sont modérés (Dwyer et al., 2004)……..88

Figure 48 : Modèle conceptuel du DROP (Cutter et al., 2008a)……...90

Figure 49 : Quotient de résilience à l'échelle des États-Unis pour chaque catégorie. A=social, B= économique, C= communautaire, D= institutionnel, E= infrastructures, F= Environnemental (Cutter et al., 2014)……...91

Figure 50 : Le DS3 Model (Serre, 2016b)……93

Figure 51 : Synthèse des résultats obtenus suite à l'analyse de la résilience du quartier Am Sandtorkai/Dalmannkai (Serre, 2016b)……...……94

Figure 52 : Index de capacité de résilience (Bakkensen et al., 2017)……96

Figure 53 : Les critères de résilience du PEOPLES Resilience Framework et les échelles spatiales qui y sont liées (Renschler et al., 2010)……..97

Figure 54 : Les objectifs de la géovisualisation de l'exploration à la communication illustrés dans le cube de géovisualisation (Maceachren and Kraak, 1997)……100

Figure 55 : Exemple des intervenants dans le processus de construction du VisAdapt, (Johansson et al., 2016)……101

Figure 56 : Prototype de VisAdapt,(Johansson et al., 2016)……...102

Figure 57 : L'interface pour rentrer les indications de son habitation individuelle (Johansson et al., 2016)……103

Figure 58 : Visualisation des effets domino à la suite d'une panne d'eau à Montréal (Robert and Cloutier, 2012)……..105

Figure 59 : L'interface d'utilisation de ViewExposed concernant la vulnérabilité sociale (Opach and Rød, 2013)……107

Figure 60 : Exemple de questions posées aux acteurs locaux (Opach and Rød, 2013)……107

Figure 61 : Processus de collaboration d'après (Toubin, 2014)……..111

Figure 62 : Entre participation et collaboration, quels acteurs ? (Toubin, 2014)……115

Figure 63 : Cartographie des services urbains parisiens (Toubin, 2014)……116

Figure 64 : Services urbains rencontrés lors du travail de recherche menée par (Toubin, 2014)……117

Figure 65 : Grille de dépendance des ressources (Toubin, 2014)……...118

Figure 66 : Grille d'évaluation des ressources produites (Toubin, 2014)……118

Figure 67 : The 100 Resilient Cities Framework, (100 Resilient Cities, s. d.)……121

Figure 68 : Extrait de la politique de résilience pour la ville de Vejle, (100 Resilient Cities, s. d.)……..122

Figure 69 : Participation des citoyens par le biais d'observatoires basés sur les TIC (Wehn et al., 2015)……124

Figure 70 : Catégorisation des différents modèles présentés……..126

Figure 71 : Schéma conceptuel de l'approche de la résilience sur un temps long (Heinzlef et al., 2019)……130

Figure 72 : Nombre d'arrêtés CatNat en Région PACA (Observatoires régional des risques en PACA, 2017)……132

Figure 73 : Inondation du Rhône et de la Durance - Scénarios fréquents, d'après ©DREAL PACA……..133

Figure 74 : Inondations du Rhône et de la Durance, Scénarios extrêmes, d'après ©DREAL PACA……..134

Figure 75 : Démarche méthodologique développée dans la thèse……..138

Figure 76 : Évolution de la thèse, constats, objectifs, résultats et perspectives……..221

Figure 77 : Résultats obtenus dans l'article 1……222

Figure 78 : Résultats obtenus dans l'article 2……224

Figure 79 : Exemple de l'interface de l'outil FME……...224

Figure 80 : Résultats obtenus dans l'article 3……225

Figure 81 : Résultats obtenus dans l'article 4……226

Figure 82 : Perspectives d'améliorations sur le plan académique……..230

Figure 83 : Un outil en interrelation entre le monde scientifique et son opérationnalisation pratique. (Loireau, 2017)……233

Figure 84 : Résilience sociale, scénario avant crise, échelle PACA……..238

Figure 85 : Représentation de la population 18-24 ans à l'échelle d'Avignon selon un calcul sur la population total de l'IRIS, scénario avant crise……...239

Figure 86 : Représentation de la population 18-24 ans à l'échelle d'Avignon selon un calcul sur les logements de l'IRIS, scénario avant crise……...239

Figure 87 : Perspectives opérationnelles……...241

Figure 88 : Résilience globale, scénario avant crise, calcul sur la population des IRIS……...242

Figure 89 : Résilience globale, scénario avant crise, calcul sur les logements des IRIS……..243

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Impacts causés par une inondation de type 1910 à Paris……41

Tableau 2 : Ressources individuelles, familiales et communautaires pour développer un processus de résilience (Fleming and Ledogar, 2008)…….59

Tableau 3 : Synthèse des approches de résilience (Barroca, 2018)……..61

Tableau 4 : Avantages et inconvénients des indicateurs Leaken……..……82

Tableau 5 : Avantages et inconvénients de l'outil SoVI……83

Tableau 6 : Avantages et inconvénients de l'outil SVI……..84

Tableau 7 : Avantages et inconvénients de l'IntVI……...87

Tableau 8 : Avantages et inconvénients de l'approche développée à Perth……...88

Tableau 9 : Avantages et inconvénients du BRIC……92

Tableau 10 : Avantages et inconvénients du DS3 Model……95

Tableau 11 : Avantages et inconvénients du Resilience Capacity Index……..96

Tableau 12 : Avantages et inconvénients du PEOPLES Resilience Framework……..98

Tableau 13 : Avantages et inconvénients du VisAdapt……..103

Tableau 14 : Avantages et inconvénients de l'outil DOMINO……105

Tableau 15 : Avantages et inconvénients de l'outil ViewExposed……108

Tableau 16 : Avantages et inconvénients de l'approche développée par (Toubin, 2014)……119

Tableau 17 : Avantages et inconvénients des 100 Villes résilientes……...123

Tableau 18 : Avantages et inconvénients des observatoires de participation citoyenne……125

TABLE DES MATIERES

RESUME 1
ABSTRACT 2
REMERCIEMENTS 3
LISTE DES FIGURES 6
LISTE DES TABLEAUX 10
TABLE DES MATIERES 11

PARTIE INTRODUCTIVE : La Résilience urbaine en question : contexte, enjeux et problématique de recherche……...15

1. Risques et incertitudes en milieux urbains……19

1.1. Les inondations : contexte et enjeux ..... *…19*
1.1.1 Les risques dans un contexte de dérèglement climatique……19
1.1.2 Les inondations : un risque omniprésent……..23

1.2. L'urbanisation aggrave les risques……31

1.2.1. L'augmentation de la population urbaine ..... ……31

1.2.2 Des espaces fragiles confrontés aux effets dominos..... 36

2. Les évolutions de la gestion des risques……..42

2.1. L'aléa comme punition divine……42
2.2. L'approche aléa-centrée……43
2.3. Le concept de vulnérabilité……45
2.3.1. La vulnérabilité physique……45
2.3.2. La vulnérabilité sociale……..46
2.3.3. La vulnérabilité territoriale ……..46
2.4. L'intégration du concept de résilience……..48

3. Synthèse……..…50

4. Objectifs de la recherche……..…..51

5. Structure du mémoire de thèse……51

PARTIE 1 ÉTAT DE L'ART : Méthodes et outils pour évaluer, modéliser et opérationnaliser la résilience……..54

1. Définir la résilience……..56

1.1. La résilience, un concept avec des origines multiples……..57
1.1.1 La résilience en physique……..57
1.1.2 La résilience en psychologie……57
1.1.3. La résilience en écologie……..60
1.1.4. La résilience au croisement des disciplines pour une nouvelle gestion des risques……..61

1.2. La résilience et/ou la vulnérabilité ?.....63

1.2.1. Une opposition des concepts discutable……63
1.2.2. Quelle temporalité de résilience ?……65

1.3. Des villes résilientes……66
1.3.1. La résilience urbaine……66
1.3.2. Le système urbain, un système complexe……67

1.4. Des aménagements résilients……70
1.4.1. Qu'est-ce qu'une ville résiliente ? ……70
1.4.2. Des exemples de projets résilients……71
1.4.3. Des exemples d'aménagements résilients……73

2. Évaluer la résilience……77

2.1. Définition des indicateurs……77
2.2. Des indicateurs dans la gestion des risques……79
2.3. Des exemples de modèles d'évaluation de vulnérabilité et de résilience……80
2.3.1. Des indicateurs de vulnérabilité……81
2.3.2. Des indicateurs de résilience……89

3. Modéliser la résilience……99

3.1. De l'utilité des systèmes spatiaux d'aide à la décision……99
3.2. L'intégration des techniques de géovisualisation dans l'analyse des risques et de la résilience…… 99
3.3. Des exemples de systèmes spatiaux d'aide à la décision……101
3.3.1. Des systèmes spatiaux d'aide à la décision pour faire face aux risques climatiques……101
3.3.2. Modéliser les effets domino dans un contexte de risque d'inondation……104
3.3.3. Modéliser la vulnérabilité……106

4. Développer des approches collaboratives pour opérationnaliser la résilience..110

4.1. La résilience à travers des approches collaboratives……110
4.1.1. Le processus de collaboration dans la gestion des risques……112
4.1.2. Impliquer les acteurs locaux pour une meilleure acceptation……113
4.1.3. Participation ou collaboration ?……114

4.2. Des approches favorisant la collaboration entre acteurs locaux et experts scientifiques……116

5. Bilan des outils, modèles et méthodologies d'opérationnalisation de la résilience urbaine…….. 126

<u>PARTIE 2 :</u> POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE ET METHODOLOGIQUE……..128

1. Positionnement scientifique et opérationnel……129

1.1. Positionnement théorique……129
1.2. La collaboration avec la Ville d'Avignon, un atout clef pour opérationnaliser la résilience urbaine……131

2. Démarche méthodologique……...136

2.1. Construire des indicateurs pour évaluer la résilience……136
2.2. Opérationnaliser la résilience via les techniques de géovisualisation……...136
2.3. Opérationnaliser la résilience via une méthodologie collaborative ……137

3. Synthèse……..138

PARTIE 3 RESULTATS : Conception d'un système spatial d'aide à la décision pour opérationnaliser la résilience ……...139

1. "Assessing and mapping urban resilience to floods with respect to cascading effects through critical infrastructure networks"……..…….141

1.1. La résilience pour répondre aux enjeux des effets dominos : contexte…….141
1.2. Élaboration d'une approche globale de résilience : apports et limites……151

2. "Operationalizing urban resilience to floods in embanked territories - Application in Avignon, Provence Alpes Côte d'Azur Region"…….153

2.1. L'opérationnalisation de la résilience : contexte……153
2.2. Méthodologie collaborative avec le Service SIG d'Avignon : apports et limites……..167

3. "A spatial decision support system for enhancing resilience to floods. Bridging resilience modelling and geovisualization techniques"……...168

3.1. Les techniques de géovisualisation dans la gestion des risques : contexte……168
3.2. Les techniques de géovisualisation pour élaborer un système spatial d'aide à la décision : apports et limites……..198

4. "Operating urban resilience strategies to face climate change and associated risks: some advances from theory to application in Canada and France"……199

4.1. Conception d'outils d'opérationnalisation de résilience : contexte……...199
4.2. Étude comparative pour élaborer un processus collaboratif d'opérationnalisation de la résilience: apports et limites……...219

PARTIE 4 DISCUSSION ……220

1. Apports académiques……221

1.1. Objectifs initiaux……..221
1.2. Résultats académiques ……222
1.2.1. Redéfinir la résilience ……222
1.2.2. Mesurer la résilience……222
1.2.3. Concevoir un système spatial d'aide à la décision……224
1.2.4. Approche collaborative……225

1.3. Apports dans le domaine de recherche……...226
1.3.1. Définir la résilience……226
1.3.2. Evaluer la résilience……227
1.3.3. Modéliser la résilience……227
1.3.4. Développer des stratégies collaboratives……228

1.4. Des limites identifiés ……228
1.5. Perspectives de recherche……229
1.5.1. De nouveaux risques……230
1.5.2. Valider l'approche sur des catastrophes passées……231
1.5.3. Un système spatial d'aide à la décision à travers la conception d'un observatoire de résilience……231

2. Apports opérationnels……235

2.1. Objectifs initiaux ……235
2.2. Résultats opérationnels……235
2.3. Apports pour la Ville d'Avignon……236
2.4. Limites opérationnelles……236
2.4.1. Limites du choix des données et des outils de traitements……236
2.4.2. Quelle échelle d'analyse pour favoriser l'aide à la décision et entraîner l'action ?……236
2.4.3. Choix des traitements de l'indicateur de résilience sociale ……238
2.4.4. Evaluer l'impact des nouveaux projets urbains……240

2.5. Perspectives opérationnelles……241
2.5.1. Amélioration des outils……241
2.5.2. Amorcer une gestion des risques plus résilientes……241
2.5.3. Evaluer la résilience de d'autres territoires……243
2.5.4. Evaluer l'impact des nouveaux projets urbains sur la résilience……243
2.5.5. Développer une collaboration sur le long terme……244

CONCLUSION 245
BIBLIOGRAPHIE 248

Partie Introductive

La résilience urbaine en question : contexte, enjeux et problématique de recherche

L'inondation est la catastrophe naturelle la plus destructrice à l'échelle mondiale, impactant 2,5 milliards de personnes sur la période 1994-2013 (EM-DAT, 2015). En France, ce risque est considéré comme le plus dommageable (Vinet, 2010) : jusqu'à 19 000 communes (Figure 1) et 14 millions de personnes (Gisclard, 2017) sont touchées. C'est la première fois qu'autant d'individus sont exposés à ce risque (Ledoux, 2006). Les inondations sont aujourd'hui considérées par le Ministère de la Transition Écologique et Solidaire comme le premier risque présent sur le territoire français.

Figure 1 : Rues inondées après la tempête Xynthia ©Bertrand Guay

Or, face à ce risque croissant (Zevenbergen et al., 2010), les enjeux ont augmenté ainsi que les coûts associés aux dommages. En 2013, par exemple, les dommages liés aux inondations étaient 50% supérieur qu'au cours de la période 2003-2012 (Pescaroli and Nones, 2016). D'ici la fin du siècle, une inondation pourrait atteindre plus de 100 milliards d'euros de dommages par an (Barroca et al., 2013). Outre les coûts monétaires, les impact des inondations relèvent également d'ordres non réductibles à un numéraire unique, avec des enjeux humains, patrimoniaux, culturels, etc. L'augmentation de ces coûts s'explique notamment par la concentration des enjeux en milieux urbains. Les aires urbaines concentrent aujourd'hui les composantes économiques, politiques, urbaines et sociales des territoires. Parallèlement, le taux d'habitants en milieux urbains a énormément augmenté, atteignant 50% d'individus vivant en ville (Zevenbergen et al., 2010). Cette concentration de biens et de populations dans les aires urbaines accroît l'exposition de ces territoires à l'augmentation des inondations. En effet, on observe dans les aires urbaines, du fait de l'interconnexion des réseaux matériels (par exemple les réseaux urbains) ou immatériels (les flux économiques par exemple), qu'une rupture de service due à une inondation peut impacter durablement le territoire et sa population notamment à cause des défaillances multiples (Lhomme et al., 2013). La vulnérabilité, définie comme la propension à être impactée, de ces territoires est donc croissante.

Les gestionnaires urbains sont également confrontés à des défis nouveaux liés aux nombreuses incertitudes croissantes. Ces incertitudes sont à la fois liées au changement

climatique (Gersonius et al., 2013) et son évolution, mais également à la croissance urbaine, aux modèles de prévision, à l'acquisition de données, etc. La gestion des risques est donc confrontée à une inadéquation des stratégies face à l'augmentation des risques en milieux urbains. C'est pourquoi on observe une transition dans la gestion des risques avec l'apparition de nouveaux concepts tels que celui de la résilience (Figure 2). La résilience urbaine est devenue un impératif d'aménagement pour préparer et adapter les populations et territoires urbains à l'augmentation sensible des risques.

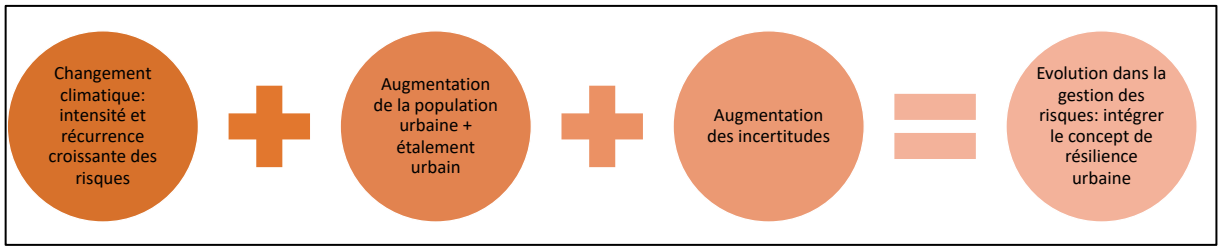

Figure 2 : Enjeux de la gestion des risques

Malgré l'adéquation de ce concept pour atténuer l'impact des effets négatifs des risques, son opérationnalisation est encore très limitée. Ce concept est aujourd'hui sur-utilisé, sollicité dans de multiples domaines (psychologie, écologie, sciences politiques, physique, géographie, etc.) et rattaché à de nombreuses notions (Emrich and Tobin, 2018). Cette multitude d'usages l'a transformé en *buzzword* (Djament-Tran et al., 2011), un mot « valise » (Rufat, 2015) qui complexifie sa compréhension et son opérationnalisation.

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail de thèse. Face à une augmentation des risques, de la population urbaine, des incertitudes, le concept de résilience devrait permettre de préparer les territoires et populations pour limiter le plus possibles les impacts négatifs. Or, son usage multidisciplinaire en fait un concept polysémique (Brand and Jax, 2007; Klein et al., 2003), abstrait (Bahadur et al., 2010) et difficile à appréhender.

⇒ ***L'objectif de cette recherche est donc de répondre aux enjeux de l'opérationnalisation de la résilience.***

Le constat, aujourd'hui, est que les outils existants permettant d'améliorer et opérationnaliser la résilience urbaine sont essentiellement tournés autour d'une approche technico-fonctionnelle. Or, un territoire est composé de multiples éléments, techniques, urbains et sociaux. Opérationnaliser la résilience vise à adapter le concept aux diverses composantes qui font partie de la ville.

⇒ ***Cette thèse postule que la construction d'un système spatial d'aide à la décision intégrant les caractéristiques techniques, urbaines et sociales d'un territoire***

permettrait de redéfinir et d'opérationnaliser la résilience afin d'entraîner une prise de décision de la part des gestionnaires et favoriser le passage à l'action.

La *Partie Introductive* de cette thèse a pour objectif de contextualiser la question des inondations et des risques en milieux urbains. Nous exposerons les évolutions dans l'approche et la gestion des risques. Enfin, nous présenterons les objectifs de la recherche et la structure du document de thèse.

La *Partie 1, État de l'art : Méthodes et outils pour évaluer, modéliser et opérationnaliser la résilience,* de cette recherche présentera des outils et approches existantes visant à opérationnaliser la résilience. Nous présenterons leurs apports et leurs limites.

Suite à la présentation des travaux sur la résilience, nous développerons notre positionnement scientifique et méthodologique (*Partie 2, Positionnement scientifique et méthodologique*). La méthodologie a permis de développer un modèle conceptuel de résilience fondé sur trois indicateurs de résilience technique, urbaine et spatiale. Ce modèle a été pensé, conçu et testé à travers une collaboration avec le Service SIG de la Ville d'Avignon.

Les résultats seront présentés dans la « *Partie 3 Résultats, Conception d'un système spatial d'aide à la décision pour opérationnaliser la résilience urbaine* ». Les résultats exposent le processus scientifique, méthodologique et la conception du système spatial d'aide à la décision. Les résultats se divisent en apports et limites autour de la question de l'évaluation de la résilience, l'élaboration d'un système spatial d'aide à la décision et le processus collaboratif développé.

Enfin, la *Partie 4 Discussion*, expose les apports et limites académiques et opérationnelles de la recherche, mais aussi les perspectives à court, moyen et long terme.

1. Risques et incertitudes en milieux urbains

1.1. Les inondations : contexte et enjeux

1.1.1. Les risques dans un contexte de dérèglement climatique

Au cours de la dernière décennie, les catastrophes ont considérablement augmenté par rapport aux siècles derniers. Les données de *Munich Re* montrent une augmentation des catastrophes liées au climat de 200 par an au début des années 80 à près de 400/an au début des années 2000 (De Graaf, 2013). En 2018, 61,7 millions de personnes ont été affectées par 289 catastrophes naturelles et 10 733 personnes en sont mortes (UNDRR, 2019). Tempêtes, ouragans, inondations sont responsables de 90% des victimes de catastrophes.

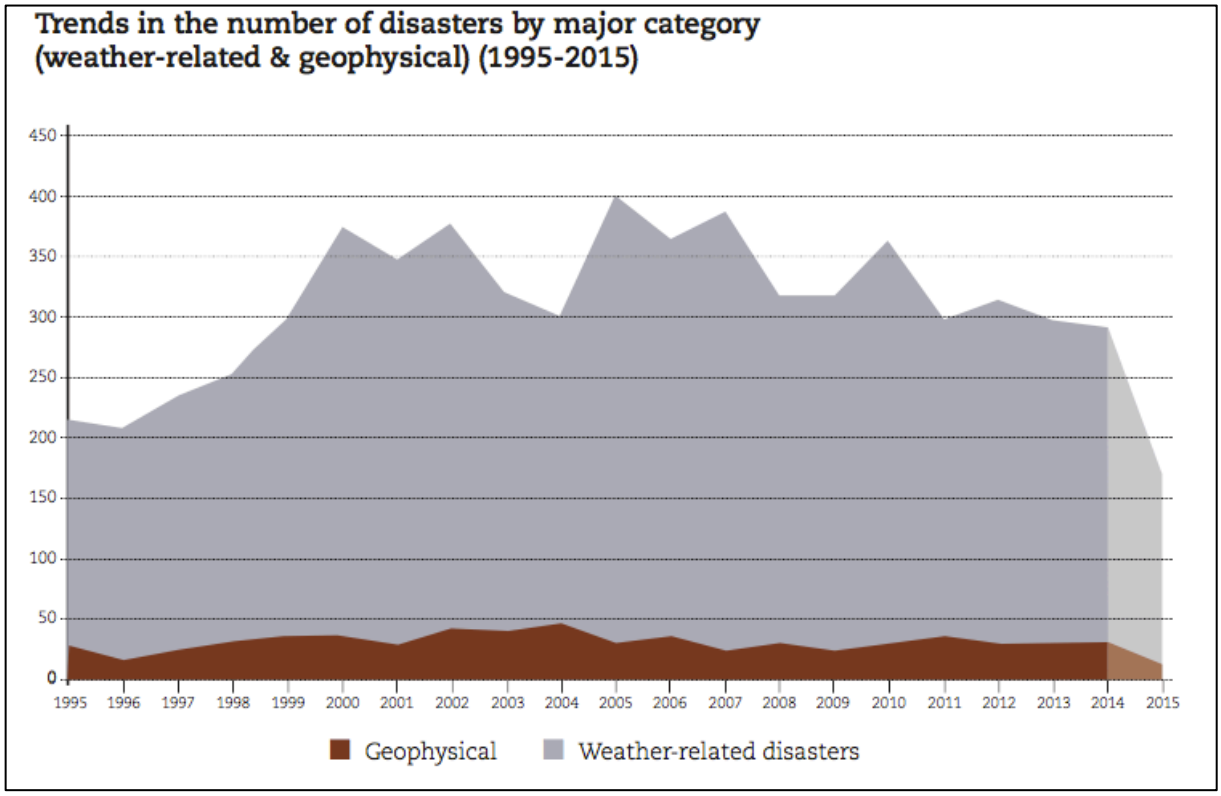

Figure 3 : Quantification du nombre de catastrophes sur la période 1995-2015, (UNISDR and CRED, 2015).

Au total, l'EM-DAT (*Emergency Events Database*) a enregistré en moyenne 335 catastrophes par an entre 2005 et 2014, soit une augmentation de 14% par rapport à la période 1995-2004 et presque deux fois le niveau enregistré de 1985 à 1994 (UNISDR and CRED, 2015). A l'heure actuelle, ce sont donc 971 millions de personnes (Figure 4) qui vivent dans

des zones exposées aux risques climatiques (Institute for Economics and Peace, 2019). Ce nombre d'individus exposés aux risques va probablement évoluer au vu de l'augmentation des catastrophes. Le coût économique, lié à l'intensité et la récurrence des catastrophes, a lui aussi augmenté. Entre 1978 et 1997 ce coût a été estimé à 895 milliards de dollars. Or, de 1998 à 2017, ce montant a augmenté de 151% atteignant 2,25 trillions de dollars (UNDRR, 2019).

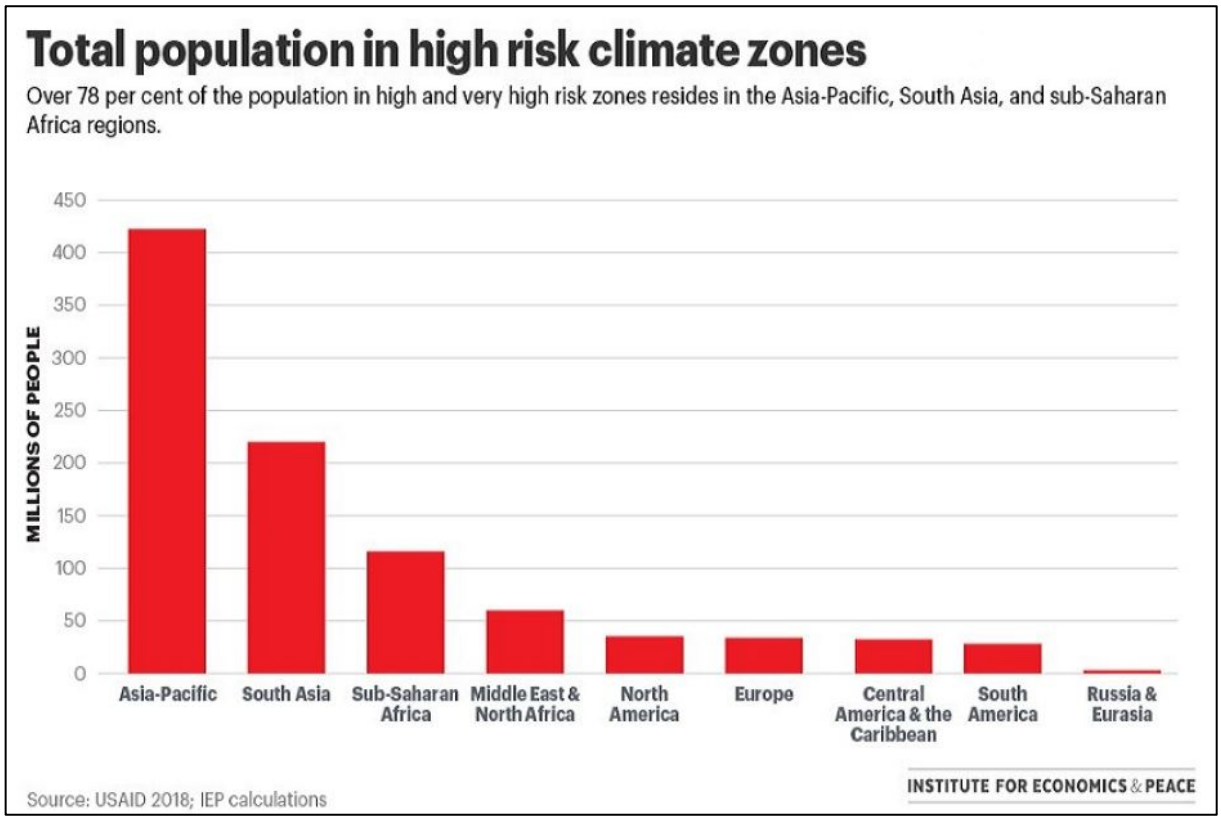

Figure 4 : Population totale localisée dans des zones soumises à des risques climatiques, (Institute for Economics and Peace, 2019)

L'augmentation sensible des catastrophes est notamment liée à l'élévation des températures moyennes mondiales. Celles-ci pourraient augmenter en moyenne de 4 à 5°C (Herring, 2012), ce qui signifie +10°C sur certains continents. Une nouvelle étude de l'Université d'Hawaï tire la sonnette d'alarme et précise qu'en l'absence de réduction majeure des émissions de CO_2 , 75% des habitants de la planète pourraient être victimes des inondations (Vargas, 2019). Nul ne sera à l'abris des événements météorologiques extrêmes qui devraient continuer à se multiplier. Cette démultiplication conduira également à des migrations de populations. Ainsi suivant un rapport de l'ONU en 2012, 250 millions de personnes devraient migrer d'ici 2050 suite à l'augmentation de ces catastrophes (Vargas, 2019). Une récente étude a alerté sur les conséquences d'une augmentation de 1 .5 degrés Celsius sur la surface terrestre entre 2030 et 2052. L'Accord de Paris (2015) prévoyait de contenir d'ici 2100 le réchauffement climatique bien en dessous de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels, précisant qu'il fallait viser une limitation de la hausse des températures à 1.5 degrés. Or, cette augmentation devrait avoir pour conséquences l'augmentation de la température de la terre et des océans dans la plupart des régions du monde, des températures extrêmement élevées dans la plupart des espaces habités,

avec des minimums extrêmes la nuit, des pluies extrêmes à certains endroits, et des sécheresses à d'autres ainsi que la poursuite de l'élévation du niveau de la mer (Figure 5) (Institute for Economics and Peace, 2019). Les prévisions varient d'un scénario *Representative Concentration Pathway* (RCP) à l'autre, scénarios qui sont soumis aux incertitudes évoquées précédemment. Les modèles de prévision établis par le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) varient de RCP 2,6 (le scénario le plus optimiste) au scénario RCP 8,6 (le scénario le plus catastrophique). Au-delà de 2100, les récentes études (Horton et al., 2018) ont alerté sur une montée des eaux pouvant atteindre 6 m (RCP 8,5) en 2150 voire des hauteurs allant entre 9 et 15 m (RCP 8,5).

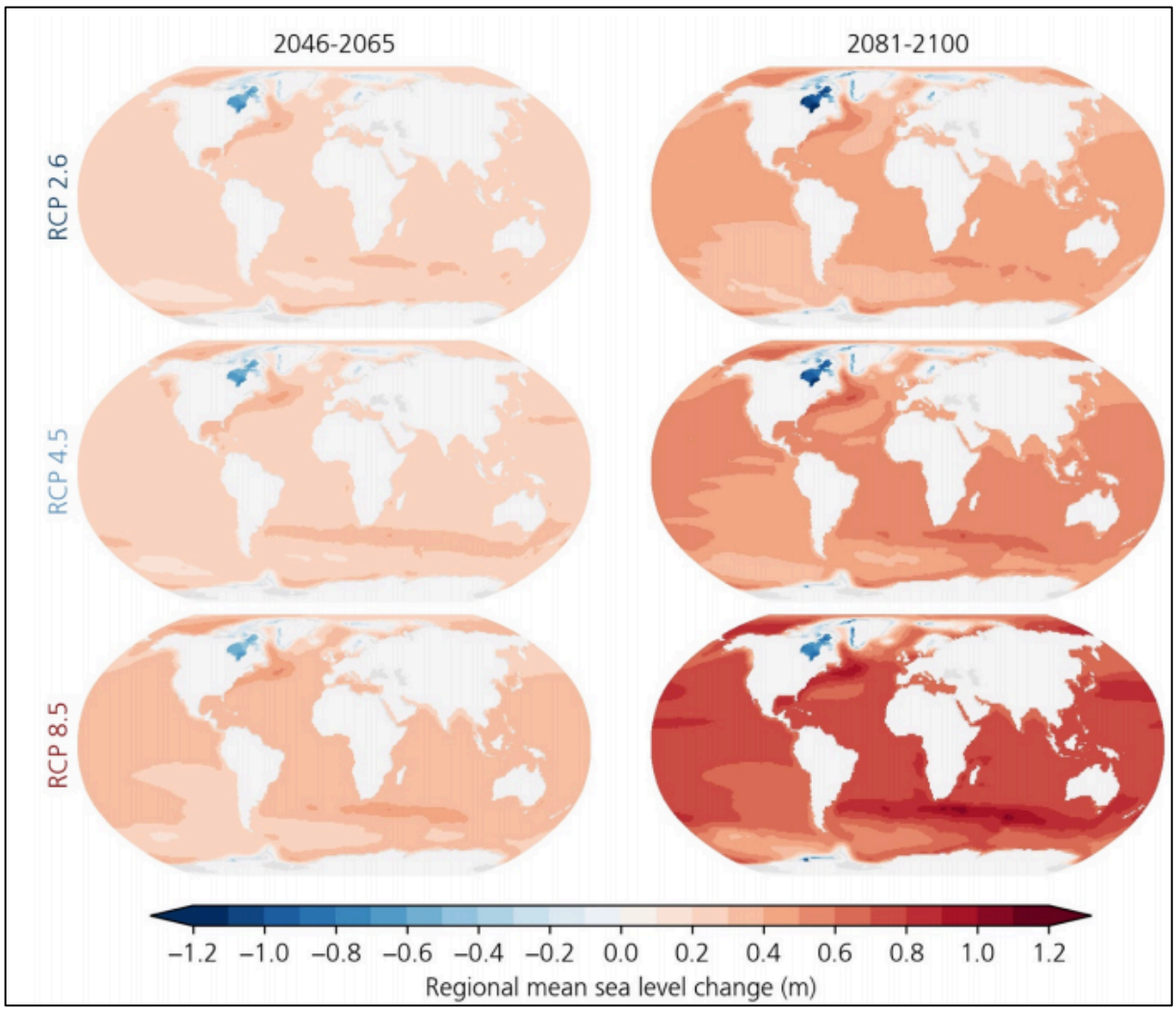

Figure 5 : Variation régionale du niveau de la mer pour RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 en mètres pour les variations du niveau de la mer. La colonne de gauche illustre la tranche de temps 2046-2065 et la colonne de droite 2081-2100 (IPCC, 2019)

Face à ces variations importantes des systèmes prévisionnels et aux évolutions attendues liées au changement climatique, de nombreuses incertitudes apparaissent. L'incertitude réduit considérablement la confiance dans l'enchaînement causes/effets et augmente la complexité d'une situation et donc sa gestion. Selon (Walker et al., 2004), l'incertitude peut être définie par sa localisation, son degrés et sa nature.

Le changement climatique génère de nombreuses incertitudes (Serre, 2011). Les incertitudes sont liées à plusieurs éléments (Merad et al., 2016):

- les incertitudes liées aux mesures, aux statistiques ;

- les incertitudes liées aux processus naturels, à sa nature, à la variabilité de l'aléa ;

- les incertitudes liées aux modèles, aux scénarios prévisionnels (du RCP 2,6 au RCP 8,5) ;

- les incertitudes liées aux données (leur fiabilité, leur acquisition et leur exploitation).

A l'heure actuelle, le dérèglement climatique conduit à une augmentation de ces incertitudes. C'est pourquoi il est nécessaire de développer des stratégies pour appréhender des évènements que les systèmes de prévisions jugent encore extrêmes ou rares (Zevenbergen et al., 2010).

Parmi ces catastrophes, les inondations représentent à elles-seules 43,4% des catastrophes liées au climat sur la période 1998-2017, affectant 2 milliards de personnes, vivant majoritairement en Asie (95%) (Wallemacq and House, 2018) (Figure 6).

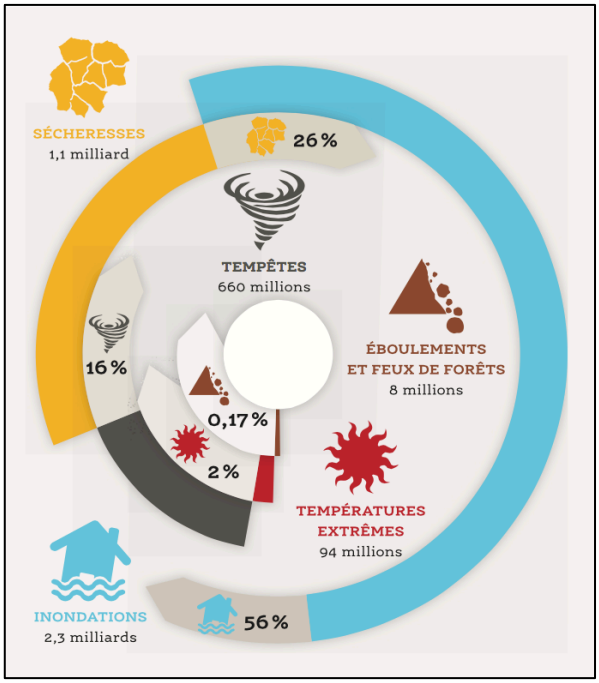

Figure 6 : Nombre de personnes affectées par types de catastrophes sur la période 1998-2017 à l'échelle mondiale (Heinzlef, 2019)

1.1.2. Les inondations : un risque omniprésent

Les inondations ont touché plus de personnes que tout autre type de catastrophe au XXIe siècle (Figure 7).

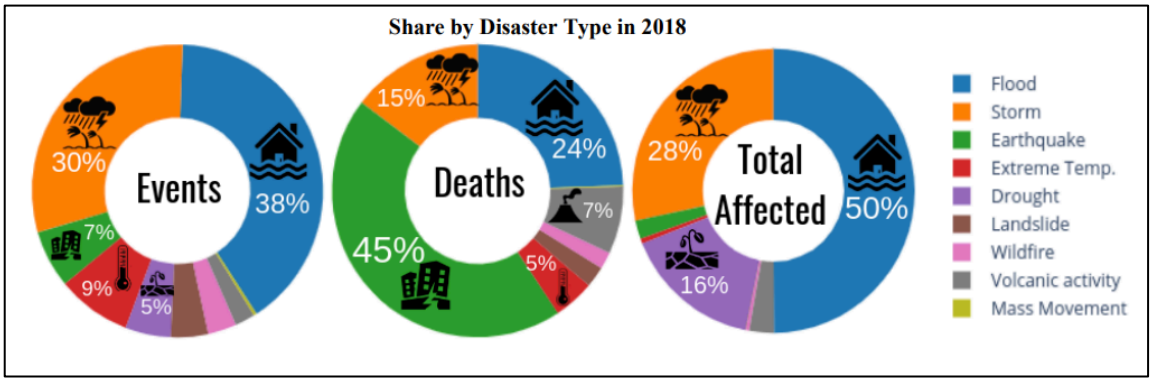

Figure 7: Part par type de catastrophe en 2018 (Cred Crunch, 2019)

En voici quelques exemples :

- Au Japon, en juillet 2019, les fortes pluies ont déclenché les inondations les plus meurtrières depuis 1982, tuant 230 personnes ;

- L'inondation soudaine d'août 2019 au Kerala, en Inde, a été de loin l'inondation la plus importante de l'année, avec 504 décès et les deux tiers des résidents de l'État ont été touchés (plus de 23 millions d'habitants). De plus, les crues éclair qui ont touché la région ont été les pires depuis les années 1920 et ont coûté 2,85 milliards de dollars ;

- Les inondations de 2014 dans le sud-est de l'Europe ont fait 80 morts et ont causé plus de 3,8 milliards de dollars en pertes économiques ;

- Les défaillances de digues à la Nouvelle-Orléans en 2005 lors de l'ouragan Katrina ont causé des pertes d'environ 150 milliards de dollars US ;

- En Allemagne, sur la période 1998-2017, les inondations ont coûté 57,9 milliards de dollars (Wallemacq and House, 2018) (Figure 8).

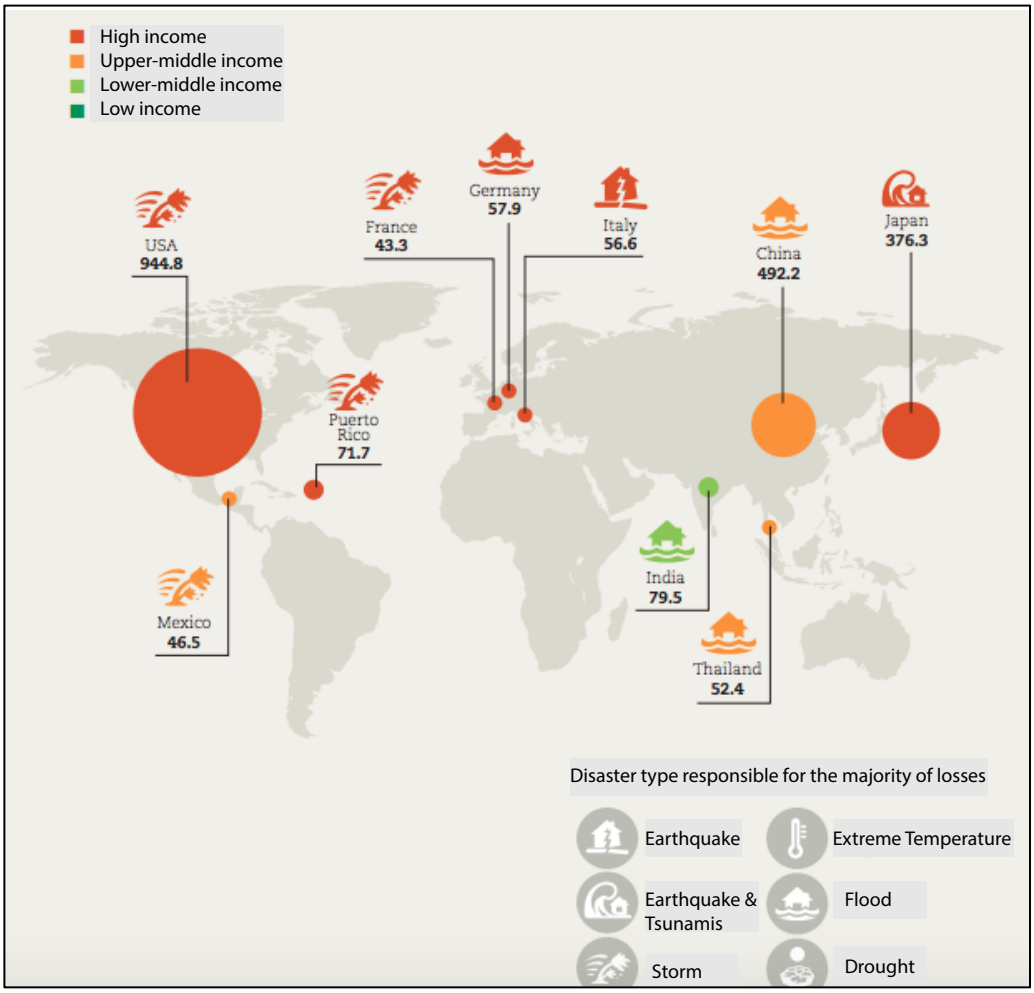

Figure 8 : Les 10 premiers pays/territoires en termes de pertes absolues (milliards de dollars US) 1998-2017, (Wallemacq and House, 2018)

En Europe, plusieurs variations sur la question des inondations sont observables. Depuis la Directive Inondation de l'Union Européenne (Directive n°2007/60/CE), tout le territoire est désormais soumis aux inondations, selon trois niveaux d'aléa : fort, moyen, modéré (Parlement Européen, 2007). Selon cette directive, tous les territoires sont donc potentiellement inondables.

D'après l'information tirée des archives de l'Observatoire des inondations de Dartmouth (Dartmouth Flood Observatory, DFO), le nombre d'inondations importantes a augmenté au cours de la période 1985-2009. Le calendrier des inondations en Europe a également changé. Des températures plus chaudes ont provoqué des inondations printanières plus précoces dans tout le nord-est de l'Europe et des maxima d'humidité du sol plus précoces ont entraîné des inondations hivernales plus précoces en Europe occidentale (Blöschl et al., 2017). La base de données contient près de 1500 événements d'inondation enregistrés au cours de la période 1980-2015 dans 33 pays membres de l'Espace Économique Européen ; toutefois, seuls 120 inondations peuvent être considérés comme des inondations graves (définies ici avec un seuil de pertes économiques supérieur à 100 millions d'euros) (Figure 9).

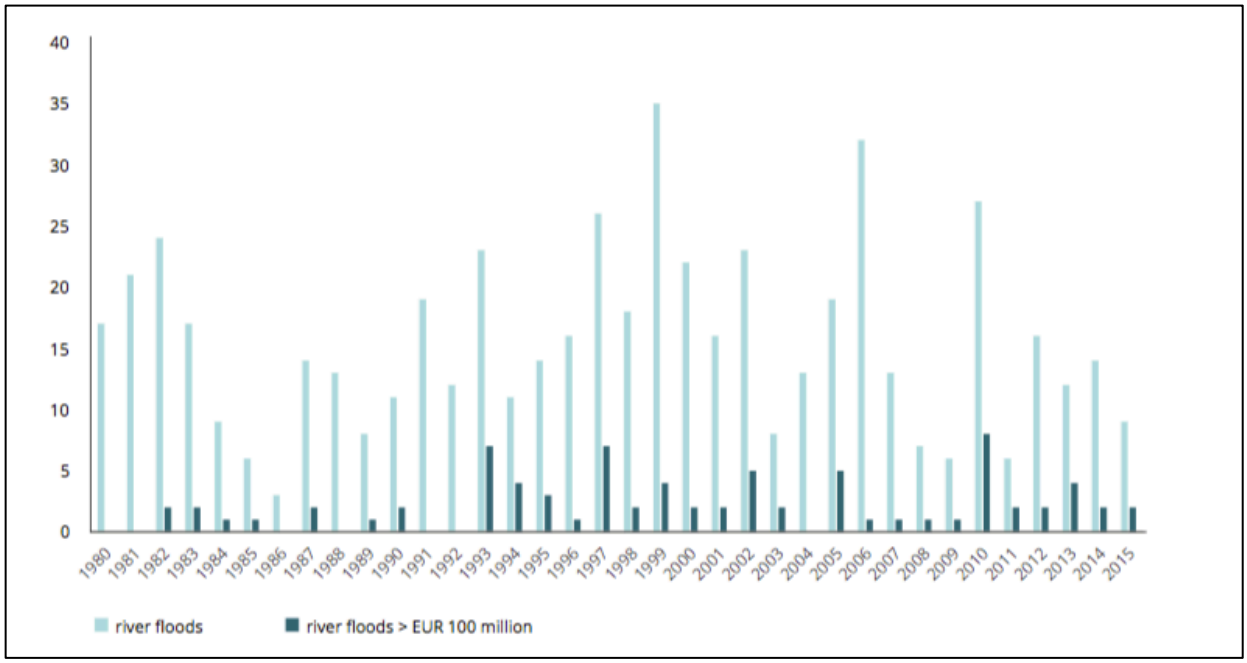

Figure 9 : Nombre d'inondations fluviales entre 1980 et 2015 dans les pays membres de l'Espace Économique Européen, (European Environment Agency, 2017)

Concernant les coûts économiques de ces inondations, les pertes ont considérablement augmenté depuis les années 1970 (Barredo, 2009). La tendance à la hausse des dommages économiques causés par les inondations est principalement imputable à des facteurs socio-économiques, tels que l'augmentation des richesses situées dans les zones inondables. En termes d'impacts sur le produit intérieur brut (PIB) régional, les risques d'inondation sont les plus élevés en l'Europe de l'Est ; la Scandinavie, l'Autriche, ou encore au Royaume-Uni et dans certaines zones de la France et de l'Italie (Lugeri et al., 2010).

Plusieurs projections ont été effectuées afin de simuler les évolutions et la tendance d'augmentation des inondations de type centennales en Europe. Les résultats de ces projections (Figure 10) ont démontré que d'ici la fin du 21ème siècle, une forte augmentation des inondations centennales est prévue dans les îles britanniques, le nord-ouest et le sud-est de la France, le nord de l'Italie et certaines régions du sud-est de l'Espagne, des Balkans et des Carpates. De légères augmentations sont prévues pour l'Europe centrale, la partie supérieure du Danube et ses principaux affluents. En revanche, il est prévu une diminution des inondations centennales dans une grande partie de l'Europe du Nord-Est en raison d'une réduction de l'accumulation de neige, et donc des inondations liées à la fonte, sous des températures hivernales plus douces. Les impacts socio-économiques, dans le cas d'un changement climatique important, pourraient être multipliés par plus de trois en Europe d'ici la fin du 21ème siècle.

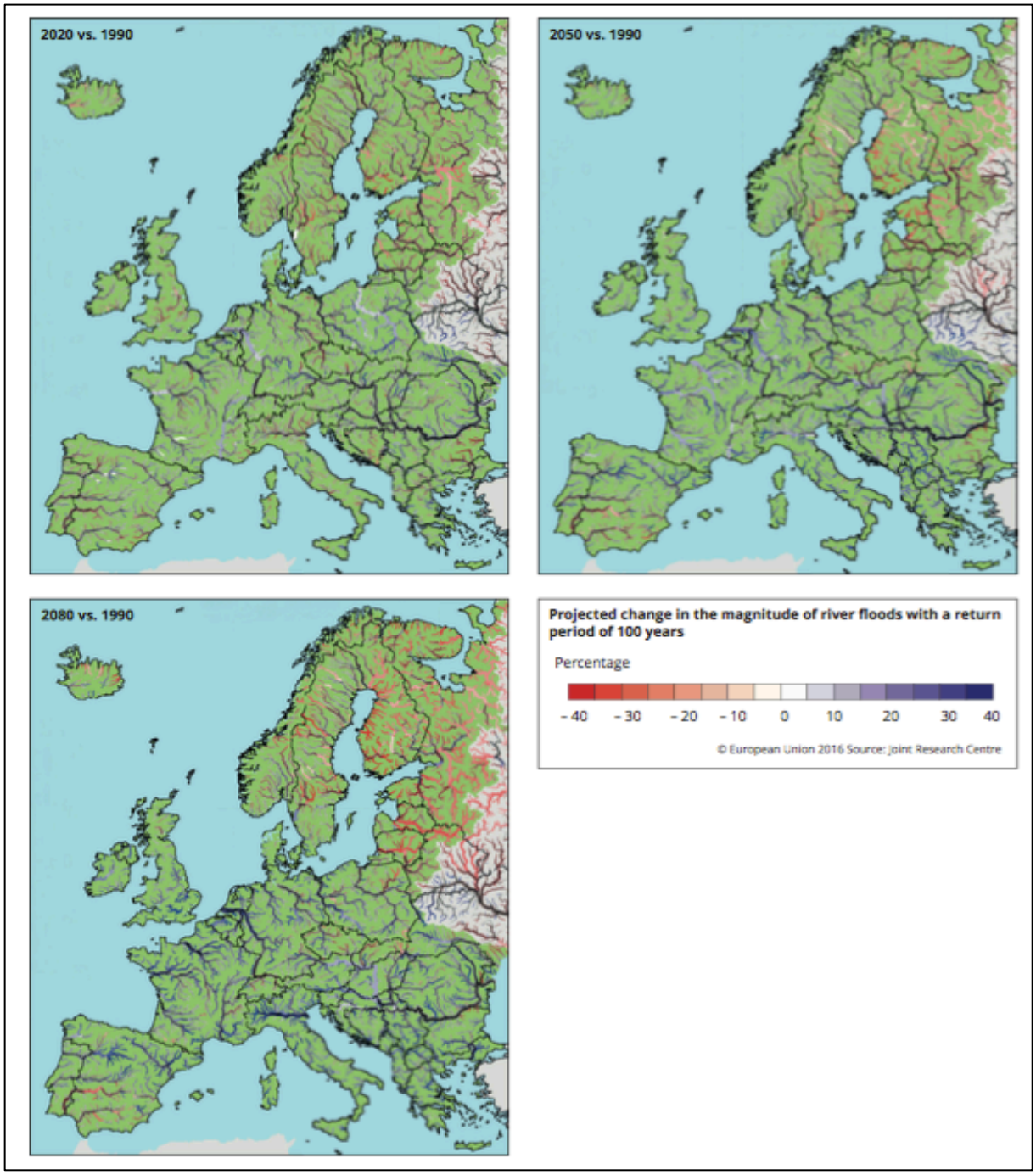

Figure 10 : Évolutions prévues des inondations de rivières avec une période de récurrence de 100 ans, au début (à gauche), à la moitié (au centre), et à la fin (à droite) du XXIe siècle, (European Environment Agency, 2017)

En France, c'est le risque le plus dommageable pour *« un coût annuel estimé à environ 250 millions d'euros »* (Lhomme, 2012). Cependant localement ce coût peut s'avérer plus élever avec notamment les inondations parisiennes en juin 2016. En effet, celles-ci ont atteint 1,4

milliards d'euros[1]. En 2008, la part de la population française exposée au risque d'inondation par cours d'eau est estimée à 10% (Figure 11). Une commune sur deux y est exposée avec un total de 3,4 millions de logements situés en zone inondable en 2008, soit 11% des résidences principales.

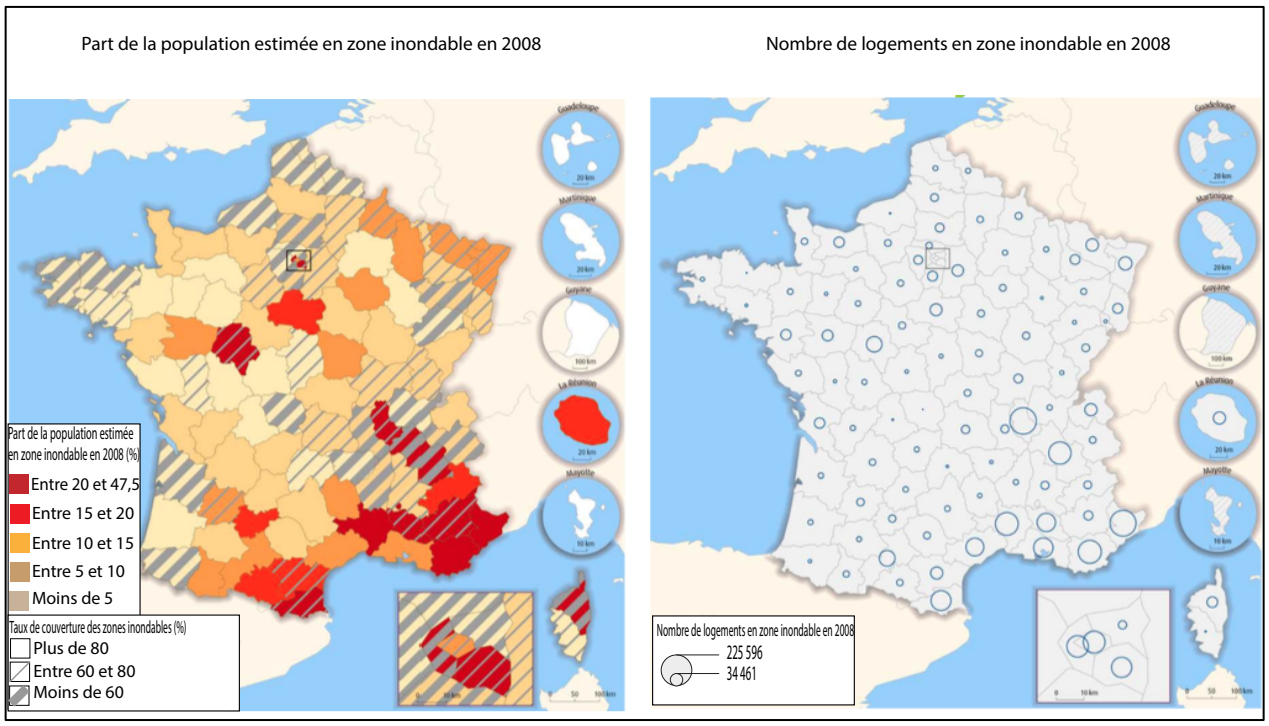

Figure 11 : Part de la population et logements situés en zone inondable, © SOeS, 2012 – Dreal, 2012 – Insee, RFL 2009 et RP 2008 - ©IGN, Contours Iris®, 2008 - ©IGN, BD Carto®, 2008

Ce risque concerne aujourd'hui plus de 14 millions de personnes. A l'heure actuelle, *l'International Disaster Data Base* classe la France à la deuxième place des pays européens exposés aux aléas naturels (Gisclard, 2017). Les départements méditerranéens sont parmi les départements les plus vulnérables face aux inondations, avec une moyenne de 10 décès par an causés par les crues (Figure 12).

[1] http://www.courrier-picard.fr/33851/article/2017-05-30/assurance-le-cout-des-inondations-de-mai-juin-2016-superieur-14-md-eur

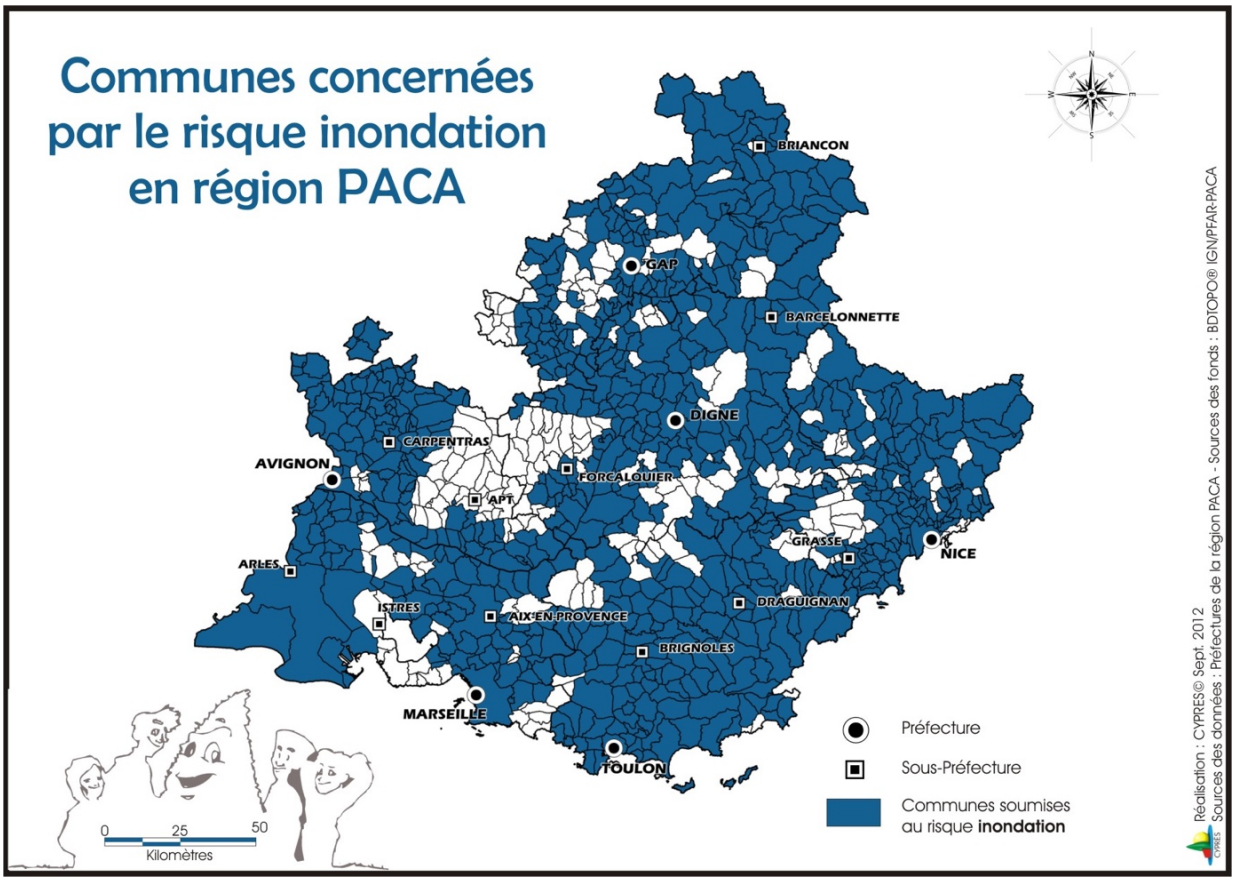

Figure 12 : Communes soumises au risque inondation en Région Provence Alpes Côte d'Azur © CYPRES 2012

Parmi ces départements, le Vaucluse représente 42% de la part de population en zone inondable et se classe à la première place des départements exposés au risque inondation, alors que la moyenne nationale habitant en zone inondable est de 11% en 2009. Avec 147 communes concernées par les inondations, le territoire vauclusiens est extrêmement vulnérable à ce risque croissant (Figure 13).

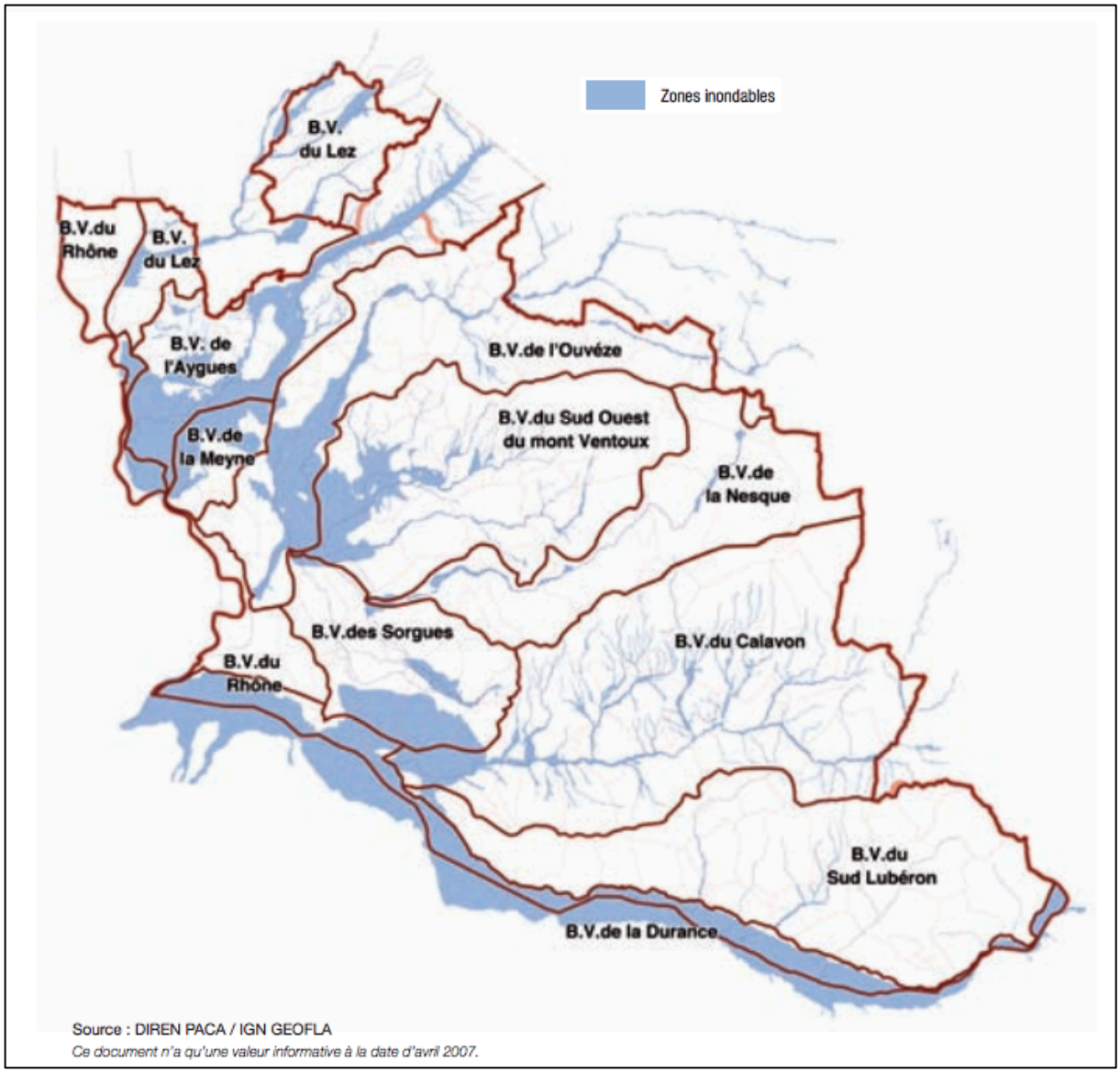

Figure 13 : Zones inondables dans le Vaucluse, ©DIREN PACA /IGN Geofla

Plusieurs types d'inondations se produisent sur le territoire, des crues lentes et torrentielles. Les inondations de plaines sont extrêmement fréquentes, notamment avec les débordements du Rhône et de la Durance. Des inondations meurtrières ont eu lieu à plusieurs reprises, que ce soit en 1840 avec la crue du Rhône, en 1856 avec les crues combinées de la Durance et du Rhône, en 1951, ou encore en 2003 avec une crue du Rhône d'occurrence supérieure à la crue centennale (Vaucluse and Service interministériel régional de défense et de protection civiles, 2008). Les conséquences de l'inondation de Décembre 2003 sont de 7 pertes humaines, 1,5 milliards d'euros de dommages et 2000 entreprises sinistrées.

> ***Le changement climatique et l'évolution des températures ont conduit à une augmentation des catastrophes à l'échelle mondiale. Parmi ces catastrophes, le risque inondation est le risque le plus dommageable. Représentant 43,4% des catastrophes naturelles sur la période 1998-2017, les inondations ont affecté 2.3 millions de personnes dans le monde. D'ici la fin du siècle, les inondations devraient coûter 100 milliards d'euros de dommages par an dans le monde, avec 75% des dommages en milieu urbain. En Europe, depuis la promulgation de la Directive Inondation, tous les territoires sont considérés comme potentiellement inondables selon trois aléas : fort, moyen, modéré. En France, une commune sur deux est exposée à ce risque et les départements méditerranéens, et plus particulièrement le Vaucluse avec 42% de la part de population vivant en zone inondable, sont exposés aux inondations.***

Les aménageurs doivent donc intégrer dans leurs actions de programmation urbaine la prise en compte du risque inondation sur l'ensemble du territoire.

1.2. L'urbanisation aggrave les risques

L'augmentation des inondations fragilise durablement les territoires et plus précisément les territoires urbains.

1.2.1. L'augmentation de la population urbaine

Le contexte de changement climatique actuel a entraîné une augmentation des catastrophes naturelles d'environ 2% par an depuis une quinzaine d'année (Catastrophes Naturelles-Observatoire permanent des catastrophes naturelles et des risques naturels, 2016). Parallèlement, l'augmentation des personnes et biens en milieux urbains fragilisent considérablement les villes. Aujourd'hui, près de trois villes sur cinq, comptant 500 000 habitants, sont exposées aux risques (Pinzon, 2018). Or, les zones urbaines produisent entre 70 et 80% de l'économie mondiale et abritent 50% de la population mondiale (Zevenbergen et al., 2010). Une telle concentration d'enjeux accroît l'impact des catastrophes et questionne sur l'avenir des villes.

La présence des risques en ville semble pourtant être une idée incongrue dans un siècle d'avancées techniques, qui n'ont eu de cesse de tenir éloigner la nature de la ville. Or, la confrontation nature/espaces urbanisés a fait naître un risque « *hybride* » (Reghezza, 2006), c'est-à-dire un aléa modifié par l'urbanisation. L'apparition d'un aléa « naturel » dans un espace urbanisé a des conséquences secondaires et imprévisibles, propres aux espaces urbains.

L'urbanisation s'est considérablement accélérée dans la deuxième moitié du XXe siècle de façon à faire face à l'augmentation de la population urbaine. Des pays tels que le Brésil sont passés de 55% de population urbaine en 1970 à 83% aujourd'hui, mais n'occupant que 0,25% du territoire brésilien (Zevenbergen et al., 2010). Cette tendance à se concentrer sur une zone précise s'observe à l'échelle mondiale : les villes n'occupent que 1% du territoire mondial (Dauphiné and Provitolo, 2013). Les pays développés n'ont de ce fait jamais concentré « *plus de valeur ajoutée au km2* » (Albouy, 2002) qu'à l'heure actuelle. La concentration humaine et urbaine pose problème face aux enjeux liés au risque d'inondation en ville. La rapidité de ce phénomène, les aires urbaines étant passées de 10% dans les années 90 à 50% (Figure 14 et Figure 15) en seulement deux décennies (Meerow et al., 2016), fragilise le territoire du fait que les villes ne soient pas préparées ou équipées pour gérer les besoins d'une telle concentration de population.

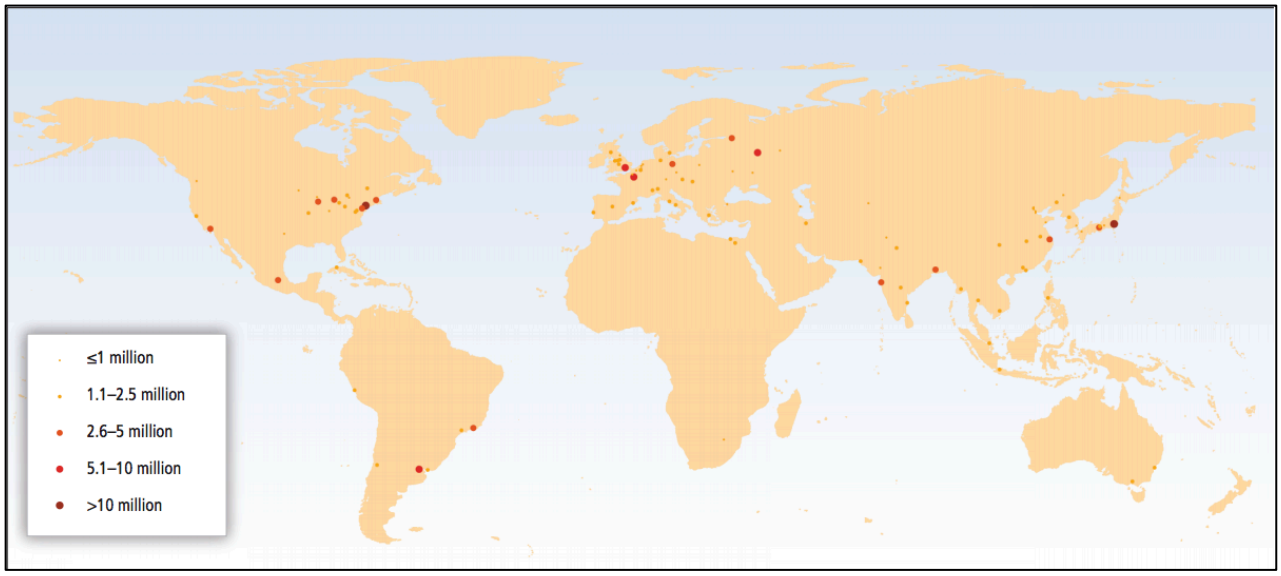

Figure 14 : Carte mondiale montrant l'emplacement des agglomérations urbaines de plus de 750 000 habitants en 1950 (d'après les statistiques de la Division de la population du DAES, 2012, (GIEC, 2014b)

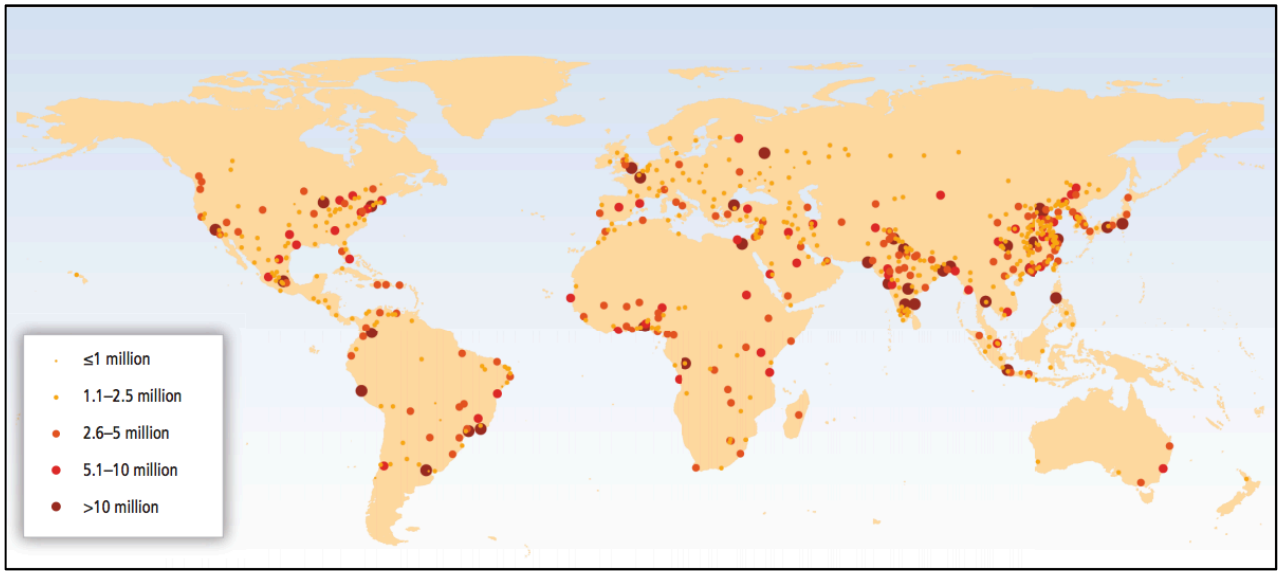

Figure 15 : Carte mondiale montrant l'emplacement des agglomérations urbaines de plus de 750 000 habitants en 2025 (d'après les statistiques de la Division de la population du DAES, 2012), (GIEC, 2014b)

Or, cette concentration risque de s'accélérer. Les projections montrent que l'urbanisation, combinée à la croissance globale de la population mondiale, pourrait ajouter 2,5 milliards d'habitants supplémentaires aux zones urbaines d'ici 2050 (United Nations, 2018a) (Figure 16).

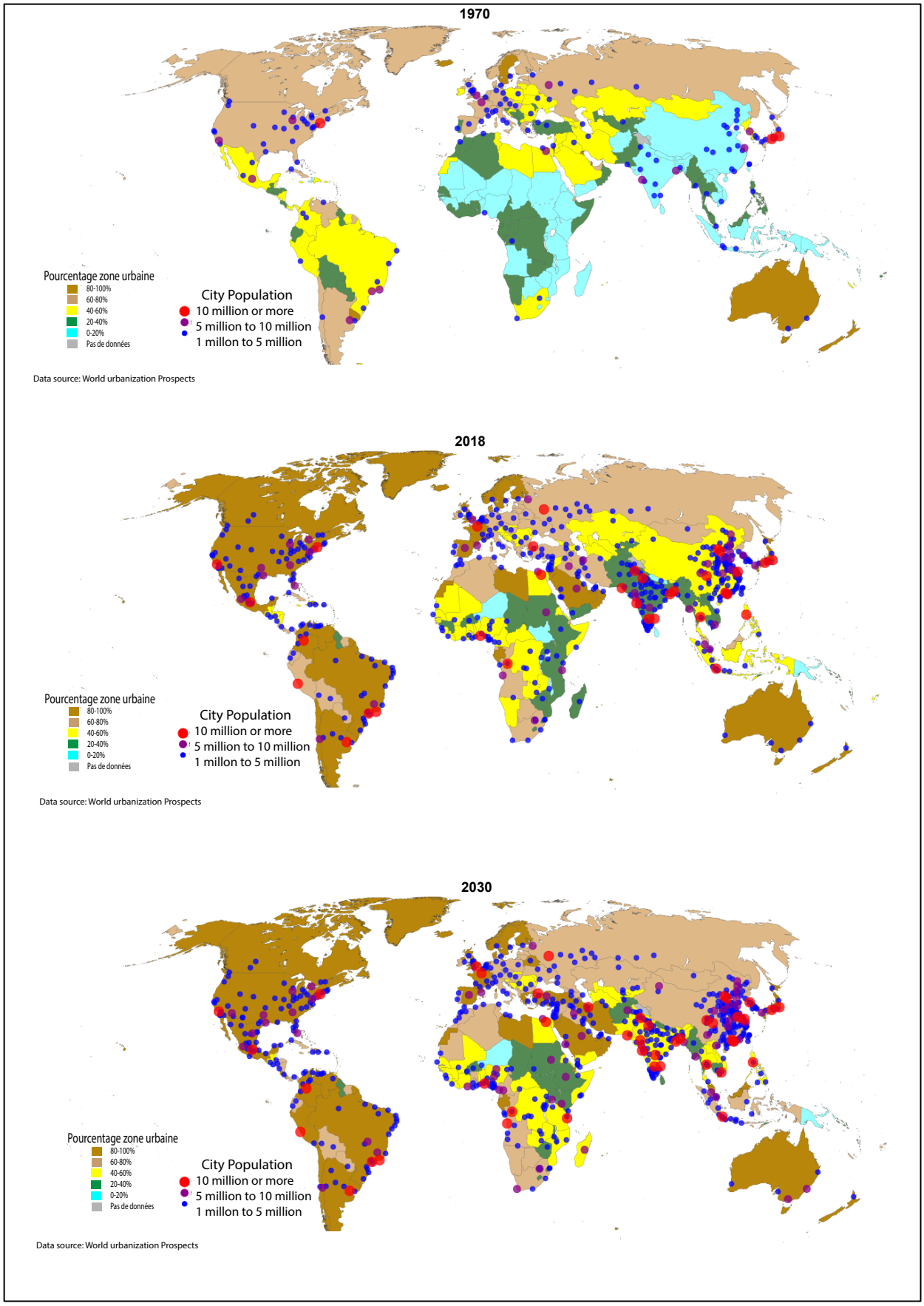

Figure 16 : Projections des aires urbaines 1970-2030 (United Nations, 2018b)

Or, les villes sont présentes essentiellement dans des zones exposées aux risques. L'installation urbaine dans des zones à risques s'explique notamment par l'évaluation des bénéfices que peut avoir une ressource (Reghezza, 2006). De nombreuses villes se sont ainsi installées proches des cours d'eau. Le fleuve représente un intérêt pour les transports, pour la production d'énergie, l'évacuation des déchets, le développement du commerce, etc. Pourtant au fil du temps, la menace est oubliée ce qui entraîne des aménagements urbains sur des zones exposées aux risques. Si le site historique est rarement en zone inondable, l'expansion urbaine conduit à dépasser les limites et seuils d'urbanisation historiques, pour venir urbaniser dans des zones moins sûres. De nouveaux quartiers voient le jour, sans aucun équipement adéquat, dans des zones telles que des zones inondables, polluées, insalubres. Ces espaces, loin d'être le signe d'un dynamisme économique, ne s'urbanisent que parce que les zones rurales sont elles-mêmes dans une détresse importante et ne peuvent répondre aux besoins des populations.

Les évolutions climatiques, accompagnées de leurs réfugiés, vont également participer à cette augmentation de la population urbaine, notamment en Asie. L'ONU prévoie que de 2.9 milliards d'urbains dans les années 1990, nous atteindrons 5 milliards en 2030. La majorité de ces nouveaux urbains s'installeraient dans les petites et moyennes villes d'Asie. La population urbaine dans les pays industrialisés augmenterait quant à elle de 11% dans les trente prochaines années (Zevenbergen et al., 2010). La conséquence de cette augmentation expose de manière exponentielle le nombre d'individus aux inondations urbaines.

Cette concentration de population sur une si petite portion du territoire a augmenté la l'exposition et donc la vulnérabilité des populations et territoires. En effet, il semble logique de considérer que plus une population et ses enjeux se concentrent sur une zone de faible superficie, plus les dégâts seront importants. Une inondation dans une zone inhabitée ne sera pas considérée et appréhendée de la même manière que dans une métropole (Mitchell, 1999). L'aléa en tant que tel ne devient un risque que lorsque des enjeux viennent à être impactés. L'exemple de la tempête Xynthia en France en 2010 est un exemple des effets de la sur-urbanisation sur la réalité de la catastrophe. Cette tempête est l'une des catastrophes les plus meurtrières en France avec 59 décès. La submersion marine (Figure 17), surcote qui a atteint 1,53 mètres à La Rochelle, a touché certaines communes jusqu'à 85% de leur superficie (Duvat-Magnan and Magnan, 2014).

Figure 17 : La tempête Xynthia causant la destruction des digues en 2010 ©Philippe Chere

Cette amplitude de la catastrophe s'est notamment expliquée par l'évolution démographique et l'urbanisation rapide sur ce territoire. Ainsi, entre 1946 et 2007, l'urbanisation des zones basses a doublé voire triplé sur certaines communes (Duvat-Magnan and Magnan, 2014), conduisant à une vulnérabilité importante. En effet, le recul des activités agricoles a eu plusieurs effets dont celui de faire disparaître la culture du risque et de sur-urbaniser les terres. Promoteurs immobiliers et investisseurs se sont emparés des terres pour construire, sur des marais ou des dunes, des lotissements, vulnérables au risque de submersion (Duvat-Magnan and Magnan, 2014). Ces terres se sont retrouvées, pour certaines, sous un mètre d'eau lors du passage de la tempête, piégeant les habitants dans des constructions inadaptées aux aléas. Le second facteur de vulnérabilité est le remplacement progressif des populations d'agriculteurs et de marins par des urbains, touristes et retraités. Ces populations vivent de façon discontinue sur le territoire et perdent donc la connaissance du fonctionnement naturel du territoire, conduisant à une vulnérabilité des populations (Duvat-Magnan and Magnan, 2014). Xynthia a donc été un événement aussi dramatique à cause des « *modes d'occupation de l'espace (qui) ont peu à peu négligé les aléas submersion et inondation* » (Duvat-Magnan and Magnan, 2014). Ce n'est donc plus seulement les catastrophes naturelles qui impactent les villes mais l'urbanisation qui conduit à une sur-vulnérabilité, conduisant à un creuset d'opportunités pour l'amplification des risques (Mitchell, 1999). La concentration est donc perçue comme un élément aggravant dans la gestion des risques. Cette concentration s'exprime par la densité de population présente sur un territoire précis. Il est établi que plus la zone est dense, plus elle est vulnérable, plus la potentialité de perte est importante. Il est donc établi qu'en *« milieu urbain les risques naturels ont tendance à avoir des conséquences plus lourdes* » (November, 1994).

Les travaux développés par Sheppard (2007), ont démontré que de nombreuses villes soumises à une forte croissance urbaine ne bénéficient pas d'outils d'urbanisation pour contrôler *a minima* cette augmentation soudaine. Le manque de concertation augmente la vulnérabilité des villes et populations soumises au risque inondation. Les populations viennent s'installer dans les zones d'expansion de crue, dans des marais, et augmentent la densité des aires déjà urbanisées, diminuant de ce fait la perméabilité des terrains. Dans tous les cas, cette croissance est exponentielle et difficile à contenir (Djament-Tran and Reghezza-Zitt, 2012).

> ***Le contexte de sur-urbanisation crée une situation de vulnérabilité exacerbée. A l'heure actuelle, la moitié des individus vivent en zone urbaine, un taux qui devrait exploser d'ici 2050. Cette concentration accentue la vulnérabilité urbaine et augmente les conséquences négatives des risques. Parmi ces risques, les inondations représentent 50% des catastrophes liées au climat en 2018. Il est donc nécessaire d'envisager des stratégies de gestion concertées et adaptées pour atténuer l'impact des risques en milieux urbains.***

1.2.2. Des espaces fragiles confrontés aux effets dominos

L'espace urbain est composé de plusieurs infrastructures, certaines plus essentielles que d'autres. Nommées Infrastructures Critiques (IC), ces infrastructures concentrent toutes les fonctions (Pescaroli and Kelman, 2017) nécessaires au bon fonctionnement d'une communauté. Le terme d'infrastructures critiques n'est apparu aux États-Unis que dans les années 90 à la suite d'une succession de plusieurs catastrophes dont le premier attentat sur le World Trade Center (1993), suivi de celui d'Oklahoma City (1995) et de l'attaque de gaz dans le métro de Tokyo (1995). Ces infrastructures sont alors définies comme vitales au point que *« leur incapacité ou leur destruction affaiblirait considérablement la défense ou la sécurité économique (des États-Unis) »*. Sont définies comme infrastructures critiques « *les télécommunications, les systèmes de de génération d'électricité, les systèmes de stockage et de transport du gaz et du pétrole, la banque et la finance, les transports de personnes, l'approvisionnement et la distribution de l'eau, les services d'urgence (médicaux, de police, contre le feu), et ceux qui assurent la continuité du gouvernement »* (Galland, 2010). Elles sont qualifiées de «critiques» car leur destruction potentielle pourrait affaiblir toute la défense et l'organisation économique (Galland, 2010) d'un pays ou d'une ville. Les infrastructures critiques peuvent être naturelles ; l'approvisionnement en eau, le stockage des eaux de crue ; ou matérielles ; réseaux d'énergie, réseaux de télécommunication, services d'urgence, réseaux de transports ; ou des systèmes virtuels de cyber-information par exemple.

Or, ces IC fonctionnent en interactions les unes avec les autres et créent donc des interdépendances (Serre, 2018) au sein de l'espace urbain (Figure 18).

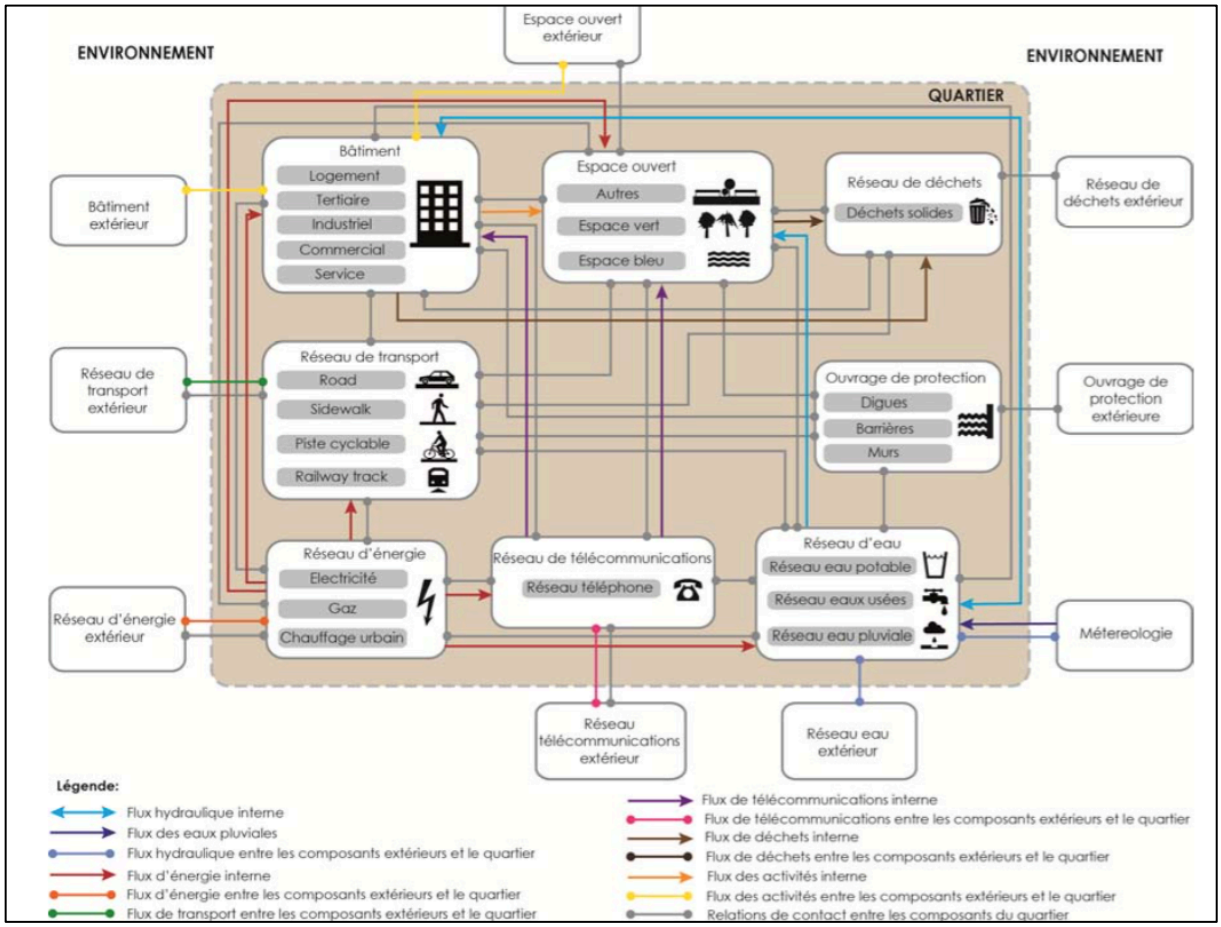

Figure 18 : Exemple d'interdépendance entre différents réseaux en milieu urbain (Serre et al., 2016)

Ces interdépendances jouent alors le rôle d'un facteur de diffusion du risque (Lhomme et al., 2010; Reghezza, 2012). Selon le concept de l'effet domino (Bouchon, 2006; Galland, 2010; Nones and Pescaroli, 2016; Pescaroli and Nones, 2016; Serre and Heinzlef, 2018), c'est-à-dire une réaction en chaîne provoquant des changements sur un territoire (Figure 19), certaines zones viennent à être impactées par la catastrophe, et ce même si elles n'étaient pas situées directement dans la zone d'extension de l'aléa inondation.

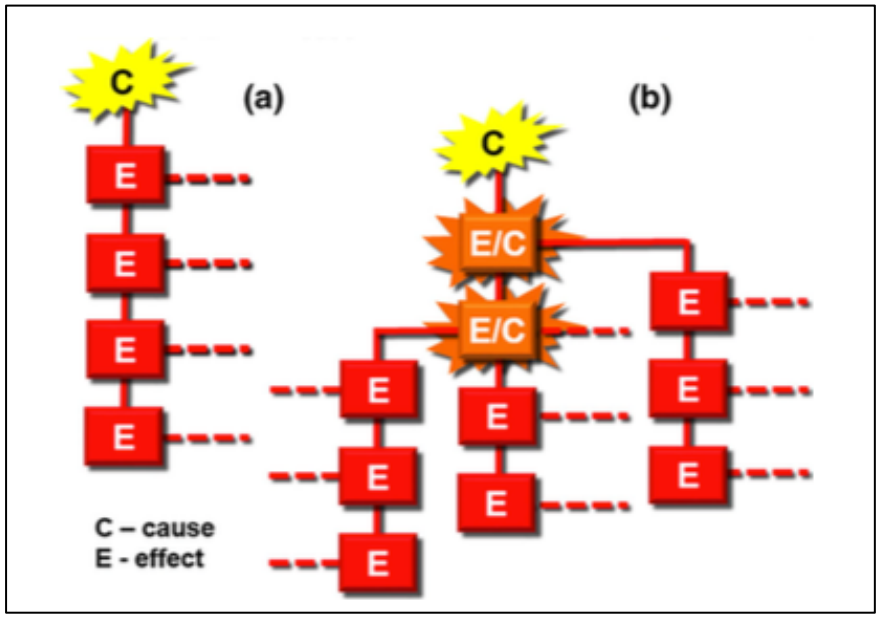

Figure 19 : Représentation visuelle des effets dominos : une trajectoire linéaire des événements en cas de catastrophe et une trajectoire en cascade, avec l'amplification et les événements secondaires (Pescaroli and Alexander, 2015)

Les zones urbaines étant interconnectées, la défaillance d'une infrastructure impactera les territoires au-delà des frontières géographiques et fonctionnelles (Boin and McConnell, 2007). Comme ces composantes sont connectées à plusieurs échelles, les IC peuvent avoir un impact beaucoup plus important que leur premier territoire d'impact. Par exemple, les inondations majeures peuvent avoir un impact sur une zone spécifique, telle qu'une route, mais comme les réseaux sont interconnectés, le risque atteindra d'autres territoires qui n'auraient pas dû naturellement être inondés (Lhomme et al., 2013) en compromettant les réseaux électriques, l'approvisionnement en ressources vitales, etc. (Nones and Pescaroli, 2016).

Dès lors, certains dégâts ne sont pas causés par des dommages physiques et directs, mais par l'interruption des activités. On différencie les impacts directs des impacts indirects. Les impacts directs sont les impacts tangibles et font références aux dommages des éléments physiques (mobilier, bâtiments, stocks, équipements, etc.). On parle d'impacts indirects quand ils ne sont pas provoqués par la catastrophe elle-même. Les impacts indirects peuvent être liés à l'interruption ou l'endommagement du service de l'infrastructure critique. Ceux-ci peuvent se produire en dehors de la zone touchée directement par la catastrophe et se prolonger dans le temps après le choc (OECD, 2014).

Le rôle des réseaux urbains est un bon exemple pour comprendre et mesurer ce que peut entraîner une panne de IC. Les réseaux urbains sont une partie essentielle du système urbain. Dans un monde interconnecté, les réseaux urbains relient de plus en plus de personnes et de territoires et offrent une grande variété de ressources et d'opportunités. Cependant, ils créent également des situations complexes d'interdépendance. Les transports publics, les réseaux électriques, le gaz, le téléphone, le chauffage, les déchets, etc. rendent la gestion du système urbain plus complexe. S'ils sont essentiels pour créer des dynamiques, des relations, des économies, ces réseaux sont également extrêmement vulnérables en cas de crise. Du fait de leur inter-connectivité, toutes les opérations urbaines en dépendent. Un seul échec peut avoir des

effets en cascade et affecter l'ensemble du réseau et, en raison d'un système urbain réticulaire, la ville entière. Certains exemples illustrent ces effets :

- L'ouragan Katrina (2005) souligne les effets dévastateurs de la rupture des IC et des effets dominos qui y sont liés (Pescaroli and Kelman, 2017; Ringenbach, 2010). L'ouragan survenu en août a entraîné la rupture des digues de protection (Hernandez, 2009) causant la destruction de 300 000 maisons (Figure 20) et entraînant 1833 décès (Knabb et al., 2005). La catastrophe a été exacerbée par les effets dominos qui ont suivi la destruction des digues et qui ont complexifié les opérations de secours. Les transports tels que les autoroutes ou les ponts ont été touchés, réduisant la possibilité de livrer les ressources vitales – comme l'eau, la nourriture et les fournitures médicales. Les établissements médicaux ont été, pour la plupart, endommagés ou détruits. Tous ces effets ont fragilisé le territoire et les habitants, complexifiant la remise en service des IC, mais aussi le bon fonctionnement social et spatial.

Figure 20 : Inondations à la Nouvelle Orléans (Cotelle, 2014)

- Les conséquences de l'ouragan Sandy à New York en 2012 est un bon exemple de ces vulnérabilités extrêmes aggravées par les pannes de IC. L'ouragan Sandy est l'un des plus grands ouragans jamais enregistrés dans l'Atlantique (Mitigation Assessment Team Report, 2013). Le centre médical Langone de l'Université de New York a été évacué après la panne des générateurs due aux inondations, causant le transfert de 200 patients (Mitigation Assessment Team Report, 2013). La destruction des réseaux électriques a laissé 21,3 millions de personnes sans électricité et la panne du système électrique a provoqué des incendies qui ont détruit 111 maisons et en ont endommagé 20 autres (Kunz et al., 2013). La vie quotidienne a été fortement perturbée par l'interruption du métro, la panne du réseau de chauffage, les systèmes de sécurité, les services de

télécommunication. En outre, des solutions alternatives telles que les groupes électrogènes de secours n'ont pas pu fonctionner, les raffineries étant en nombre insuffisant et incapables de fournir le carburant nécessaire. Si les dommages directs ont été estimés à 32,8 milliards de réparations et de restauration (Figure 21), les pertes indirectes ont coûté beaucoup plus cher à la ville et aux citoyens.

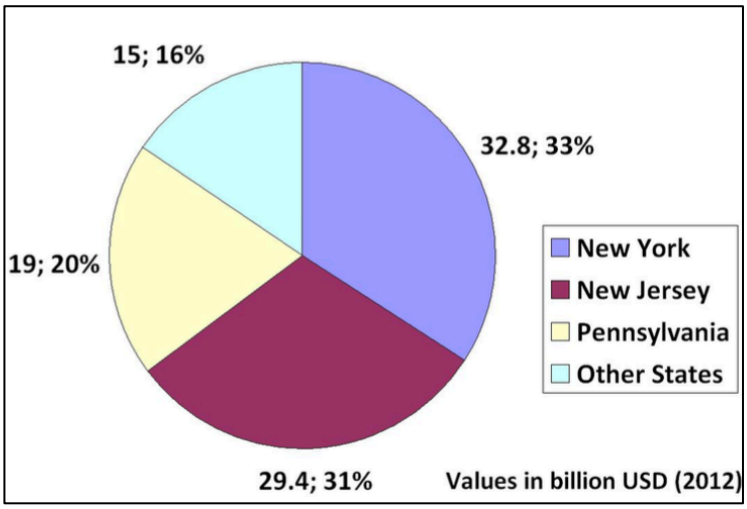

Figure 21 : Coûts des dommages directs causés par l'ouragan Sandy (Kunz et al., 2013)

La non préparation des gestionnaires et citoyens a considérablement augmenté les impacts de la crise. Par exemple, l'ordre d'évacuation tardif et la désinformation ont entraîné l'impossibilité d'évacuer certaines institutions. En outre, la crise a mis en évidence la vulnérabilité des réseaux d'égouts, la mauvaise anticipation des pannes de réseau, l'absence d'un plan B d'accès aux générateurs et antennes relais et l'installation de barrières anti-inondations résistantes (Le Haut Comité Français pour la Défense Civile, 2013). Dans ce cas, le territoire et la société sur-connectés ont créé de nouveaux risques et rendu la gestion de la crise et de l'après-crise plus difficile et plus complexe.

- En Ile-de-France, « *peuplée d'une douzaine de millions d'habitants, ce sont quelque 830 000 personnes qui pourraient être directement exposées aux inondations* » (Terrin et al., 2014). Ainsi une inondation de type 1910 (Figure 5), impacterait durablement Paris et sa région (Tableau 1).

Impacts réseaux	Impacts économiques	Impacts patrimoniaux	Impacts administratifs
- 200 km de tunnels inondés - 48 ponts impraticables - 4 autoroutes fermées - 320 000 logements sans gaz - Fourniture d'eau potable réduite de 30% - Trois usines d'incinération fermées	- 3964 locaux commerciaux touchés - 40% des entreprises sous 1m d'eau	- 3 bibliothèques inondées (François Mitterrand, Mazarine et bibliothèque de l'institut) - Musées touchés (Musée du Louvre, Musée d'Orsay, Muséum d'Histoire Naturelle, etc.)	- Archives de la police, de la gendarmerie et des assurances

Tableau 1 : Impacts causés par une inondation de type 1910 à Paris (Reghezza, 2006)

Les sociétés et territoires sont donc profondément vulnérables face à de potentielles ruptures fonctionnelles dues à une crise (Boin and McConnell, 2007). Si l'aléa persiste (séisme, inondation, ouragan, avalanche, etc.), il est transformé par « *l'hybridation nature-société* » (Reghezza, 2006), c'est à dire par les agissements et pratiques de l'homme dans son milieu. Ainsi, si les risques naturels ne sont pas nouveaux, leurs impacts, eux sont, évolutifs dû au changement climatique, à la croissance urbaine et aux changements structurels urbains.

> ***Dans un monde sur-connecté, l'interdépendance entre les systèmes créée par les réseaux fragilise les territoires urbains. Ces infrastructures critiques peuvent à la fois être synonymes de richesses comme de vulnérabilités. Face à la rupture potentielle d'une IC et à cause du processus de l'effet domino, une réaction en chaîne, les territoires peuvent être durablement impactés au-delà des zones inondables.***

2. Les évolutions de la gestion des risques

Face à ces incertitudes croissantes concernant l'augmentation des risques et leurs impacts en milieux urbains, les experts et gestionnaires urbains doivent innover quant à leurs stratégies de gestion des risques (Figure 22).

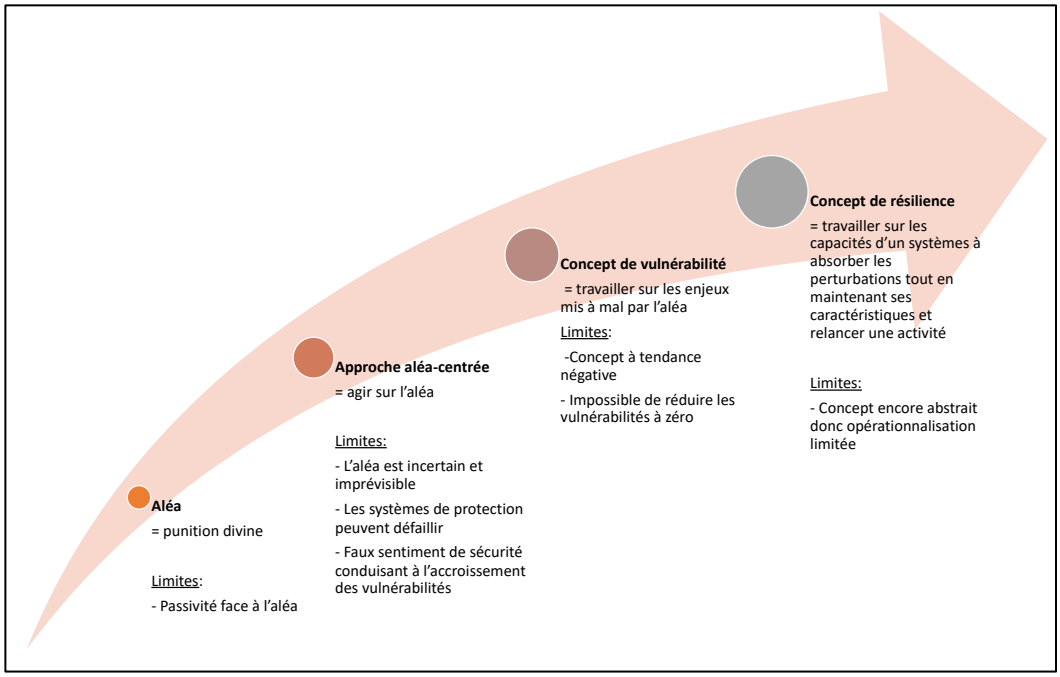

Figure 22 : Évolution de la gestion des risques

2.1. L'aléa comme punition divine

Pendant des siècles, l'aléa a été interprété comme une punition divine des péchés et de la prétention humaine (Moreau, 2017). Cette période s'est divisée en deux temps, l'âge du sang, pendant lequel des sacrifices devaient avoir lieu pour atténuer la colère des divinités, et l'âge des larmes, pendant lequel la prière était le moyen pour attirer la clémence divine (Kervern, 1995). Cette association de la fatalité à l'événement naturel a perduré dans les esprits jusqu'au XVIIIe siècle. L'avancée des Lumières et des connaissances naturalistes et environnementalistes permettent d'analyser « scientifiquement » les aléas naturels et font place à l'âge des neurones (Kervern, 1995). Le projet « *social* » (Juanals, 2002) de l'Encyclopédie, ou Dictionnaire Raisonné des Sciences, des Arts et des Métiers, permet de concentrer tous les savoirs pour les mettre à disposition de tout à chacun. Les nouvelles connaissances scientifiques telles que le modèle héliocentrique de Copernic ou encore la gravitation universelle de Newton, n'avaient jamais été compilés dans un seul et même ouvrage. Cette révolution scientifique a permis de diffuser des connaissances sur le monde physique et scientifique rendant de ce fait les aléas naturels plus compréhensibles. Cette « *laïcisation du danger* » (Veyret and Reghezza, 2006) laisse à penser qu'il est désormais possible d'agir sur l'aléa (Cutter, 1994), de le diminuer, voire de le contrôler. Cette sécularisation du terme se dévoile par l'échange épistolaire entre

Voltaire et Rousseau à propos du désastre de Lisbonne. Ce séisme, suivi d'un tsunami (Figure 23) a engendré la mort d'environ 50 à 70 000 personnes (Gisclard, 2017).

Figure 23 : Séisme de Lisbonne en 1755 ©Geostrategia

Cette catastrophe a conduit à une remise en question de la justice divine et de sa place dans les éléments naturels. Par ces mots, « *… rassemblé là vingt mille maisons de six à sept étages, et que si les habitants de cette grande ville eussent été dispersés plus également et plus légèrement logés, le dégât eut été beaucoup moindre et peut-être nul* », Rousseau met en avant l'idée que c'est l'ignorance et l'imprudence des hommes qui a conduit à une situation vulnérable. La construction d'une ville aussi dense, et la concentration d'une telle population en un seul et même endroit expliquerait le nombre de victime. Cette vision enterre définitivement la relation préétablie divin-nature et laisse la place à l'expression de « catastrophe naturelle » (Reghezza, 2006) en écartant le fatalisme pour mettre en avant la responsabilité humaine face à l'ampleur du désastre (Albouy, 2002).

2.2. L'approche aléa-centrée

Depuis Lisbonne, beaucoup de progrès ont été faits pour expliquer et agir sur les phénomènes dits « naturels ». Grâce aux nouvelles connaissances, la société humaine s'imagine désormais pouvoir canaliser les catastrophes naturelles et, tel le vieux rêve de Descartes, être « *maître et possesseur de la nature* » (Reghezza, 2006). Cette position d'aléa-centrée (ou technocentriste) entraîne une succession de grands travaux pour modifier le fonctionnement naturel des cours d'eau. Cependant, ce paradigme technocentriste a ses limites. Tout d'abord la nature même d'un aléa rend sa gestion complexe et surtout incertaine. L'aléa est difficilement prévisible et ce malgré les avancées techniques et scientifiques réalisées au cours des dernières années. Chaque outil de modélisation sous-estime les composantes physiques d'un phénomène, que ce soit à cause de l'incertitude liée à la nature, à la variabilité des processus spatio-temporels

(précipitations, températures, pression atmosphérique, etc.) ou encore de par l'acquisition des données et de leur traitement (Maskey, 2004). Faire reposer toute la gestion du risque sur ces techniques informatiques n'est pas une solution, tout comme investir uniquement dans les systèmes de protection qui peuvent défaillir. On observe ces nombreuses défaillances à l'échelle internationale. Pour n'en citer que quelques-uns :

- L'inondation du Mississipi à Saint-Louis (États-Unis), en 1998, a causé la destruction des digues de 15 mètres de hauteur. Quelques années plus tard, en 2005, le cyclone Katrina a détruit à nouveau les digues, entraînant la mort de 1500 personnes.
- Sur le territoire national, la tempête Xynthia en 2010 a causé la rupture des digues (Figure 24) et la mort de 41 personnes *(*Serre et al.,2017).

Figure 24 : Vue des digues à Saint-Martin-de-Ré après le passage de Xyntia ©AFP Xavier Leoty

De plus, cette gestion aléa-centrée ne peut et ne prend pas en compte la question de seuil. Tout événement, tout aléa a une temporalité bien précise, avec un début une fin et surtout une amplitude. Or, si l'on se protège d'une inondation qui, selon études et expériences, ne dépasse pas 6 mètres, que faire lorsque celle-ci atteindra 10 mètres ? Plus le seuil auquel on s'est préparé est élevé, plus l'aléa qui le surpassera sera fort avec des conséquences catastrophiques, car non-envisagées. De plus, ce paradigme qui laisse penser que l'aléa est maîtrisé entraîne l'utopie irréaliste du risque zéro (Djament-Tran et al., 2011). Or, « *l'histoire montre que cette politique a toujours conduit à une fuite en avant, les ouvrages de protection étant inévitablement un jour ou l'autre dépassés* » (Ledoux, 2006). De plus, cette politique augmente bien souvent la vulnérabilité des populations, celles-ci se pensant en sécurité. Leur comportement est alors inadéquat lorsque la catastrophe survient.

L'approche aléa-centrée a plusieurs limites :

- ***Les défaillances des systèmes de protection sont nombreuses ;***
- ***La question de seuil n'est pas respectée et donc l'adéquation des services de protection avec l'aléa n'est pas toujours exacte ;***
- ***Cette approche entraîne une politique de « risque zéro » et véhicule l'idée que l'aléa est entièrement maîtrisé.***

2.3. Le concept de vulnérabilité

Constatant les limites de cette approche, les experts ont cherché à intégrer d'autres concepts à l'analyse des risques, dont celui de vulnérabilité. L'intégration de la vulnérabilité découle d'une prise de conscience de l'inefficacité de l'approche classique des catastrophes naturelles qui ne prend pas ou peu en compte la dimension sociale des risques. L'intégration de ce concept, complexe à définir (Barroca et al., 2013), laisse entendre que si l'on ne peut pas complétement agir et maîtriser les éléments naturels, l'on peut tout du moins travailler sur les enjeux mis à mal par le risque (Becerra, 2012). La société et son environnement sont désormais directement intégrés à la gestion du risque. Pour lutter contre un événement naturel il est démontré qu'il est essentiel de développer la capacité d'une société et d'un milieu naturel à « *encaisser* » un choc (Becerra, 2012). Les composantes sociales sont alors représentatives d'un fonctionnement socio-économique, vulnérable ou non. Ce terme polysémique a étymologiquement une dimension négative et s'entend comme un état de faiblesse, un manque, inhérent à toute société humaine. Du latin *vulnerare* (blesser), la vulnérabilité apparaît comme *« la propension d'une société donnée à subir des dommages en cas de manifestation d'un phénomène naturel ou anthropique* » (d'Ercole et al., 1995). Trois approches distinctes permettent de définir la vulnérabilité : la vulnérabilité physique, la vulnérabilité sociale et la vulnérabilité territoriale (Dauphiné and Provitolo, 2013).

2.3.1. La vulnérabilité physique

La vulnérabilité physique, la plus ancienne, tend à déterminer la vulnérabilité « *à partir d'une mesure de l'endommagement réel ou potentiel des éléments menacés par une catastrophe* » (Dauphiné and Provitolo, 2013). Ces dommages peuvent être à la fois humains, matériels, environnementaux, techniques etc., et s'analysent en fonction de l'exposition des enjeux face à un aléa, de la résistance et de leur sensibilité.

- L'exposition peut être définie par la proximité des enjeux avec un aléa. Ainsi, plus une zone concentre beaucoup d'enjeux (telle une ville, concentrant des enjeux économiques, sociaux, politiques, territoriaux, techniques, environnementaux, patrimoniaux, organisationnels, (Provitolo, 2007) etc.) et est proche d'un aléa (exemple : cours d'eau sujet à de forts débordements), plus l'exposition sera qualifiée d'importante ;

- La résistance quant à elle fait écho à la capacité d'un système à se défendre d'une perturbation sans être impacté par celle-ci. La résistance est essentiellement d'ordre physique (digue/mur/bâti) ;

- Enfin la sensibilité est définie comme la propension d'endommagement que des enjeux peuvent subir. Ainsi, plus un système est sensible, plus il sera vulnérable à un aléa et plus les pertes seront importantes (Dauphiné and Provitolo, 2013).

2.3.2. La vulnérabilité sociale

La vulnérabilité sociale, également appelée vulnérabilité d'organisation, traduit la capacité d'une société à faire face, à anticiper et à s'adapter aux risques (d'Ercole et al., 1995). Synthétiquement parlant, on considère que plus un système est capable de se remettre après une catastrophe, moins il est vulnérable (Dauphiné and Provitolo, 2013). On considère souvent que des éléments tels que le statut socio-économique, l'âge, le sexe, le milieu socio-culturel jouent un rôle essentiel dans la vulnérabilité des populations (Cutter et al., 2010; Cyrulnik and Jorland, 2012). Cette approche de la vulnérabilité peut se retrouver dans l'analyse de la résilience, notamment à travers l'évaluation de la résilience sociale.

2.3.3. La vulnérabilité territoriale

Enfin la vulnérabilité territoriale identifie les aires spatiales susceptibles de subir des dommages importants. Il existerait six formes de vulnérabilité (Dauphiné and Provitolo, 2013) ; la faiblesse intrinsèque des enjeux, la dépendance (voire l'interdépendance) des systèmes, l'exposition aux aléas, la potentialité d'endommagement, la capacité de résistance, les alternatives développées et la capacité de gestion des situations critiques. Ces fragilités sont exacerbées dans les aires urbaines car la contiguïté des enjeux participe à la diffusion des aléas, diffusion aussi appelée « effet domino » (Serre et Heinzlef, 2018).

Le binôme aléa-vulnérabilité semble dès lors répondre aux enjeux de gestion des risques : l'approche aléa-centrée répond aux besoins techniciste, l'approche vulnérabilité aux enjeux sociaux. Cependant, aucune de ces définitions n'est unique et claire, celles-ci évoluant d'un chercheur à l'autre. En outre, cette dichotomie aléa physique/ population ne s'adapte pas à la diversité des interactions présentes notamment en milieux urbains et propose une analyse plus segmentée que systémique. *« Or, certains risques mettent en jeu, par effet domino, des chaînes d'endommagement qui amplifient les conséquences de la perturbation de départ, multiplient le nombre et la nature des dommages, déplacent et diffusent les conséquences de l'aléa bien au-delà de la zone d'impact initiale »* (Meschinet de Richemond and Reghezza, 2010). Dès lors, une analyse segmentée est déconnectée de la réalité systémique du terrain. Si l'on prend l'exemple de l'Ouragan Katrina (2005) qui a détruit la Nouvelle-Orléans, ce n'est pas tant le cyclone lui-même qui a détruit la ville mais « *la non prise en compte d'une information*

régulatrice qui existait depuis des années (et les) défaillances en chaîne du système d'alerte et des secours au moment de la catastrophe » (Mancebo, 2006). Une catastrophe est donc composée d'interactions complexes, souvent non prévisibles, et la qualifier de « naturelle » la réduit à une analyse dichotomique entre aléa et vulnérabilité. Il est donc nécessaire d'envisager une gestion des risques plus adaptées à la complexité des réseaux et aires urbaines, gestion capable d'analyser les interactions entre enjeux et composantes urbaines.

> ***A travers le concept de vulnérabilité on peut identifier les enjeux endommagés lors d'une catastrophe. L'approche de la vulnérabilité peut avoir plusieurs limites opérationnelles :***
>
> - ***La connotation négative de la vulnérabilité peut conduire à limiter la méthodologie à l'évaluation des pertes ;***
> - ***L'impossibilité de réduire les vulnérabilités à zéro peut conduire à une vision défaitiste de la gestion des risques ;***
> - ***La vulnérabilité, s'axant autour des dommages, peut être étudiée uniquement a posteriori d'une catastrophe sans prendre en compte les interactions entre les éléments à différentes échelles temporelles.***

2.4. L'intégration du concept de résilience

Parmi ces stratégies, rendre les villes plus « résilientes » semblent être devenu un impératif (Djament-Tran et al., 2011). Ce concept se définit comme la capacité d'un (éco)système à « *absorber les perturbations et maintenir ses propres caractéristiques* » malgré un choc (Holling, 1973) et à relancer une activité après celui-ci (Figure 25).

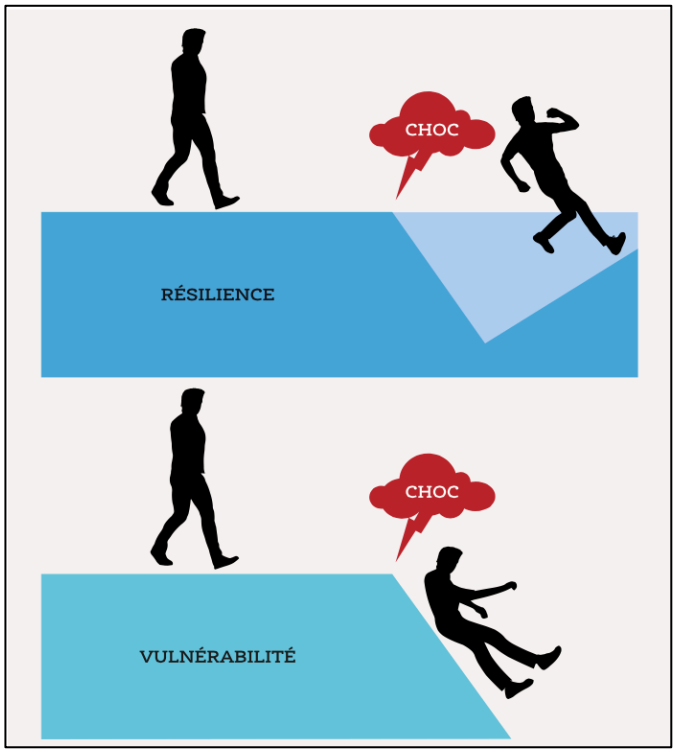

Figure 25 : Résilience vs vulnérabilité (Heinzlef, 2019)

Si beaucoup de villes peuvent d'ores et déjà être qualifiées de résilientes, pour unique raison qu'elles sont encore présentes malgré le passage des années et des crises (Djament-Tran and Reghezza-Zitt, 2012), certaines sont néanmoins plus rapides à se remettre d'un choc. Il est alors intéressant de déterminer les caractéristiques susceptibles de permettre à un système urbain de se préparer au mieux, vivre l'événement perturbateur, et s'en remettre le plus rapidement possible. Ce concept s'adapte parfaitement aux interactions socio-économiques et aux difficiles compromis nécessaires entre développement économique, attractivité sociale et territoriale et gestion des risques naturels. La résilience semble être devenue un nouvel impératif pour les gestionnaires, urbanistes et chercheurs. Pourtant les enjeux opérationnels sont encore nombreux. La résilience reste aujourd'hui un concept difficilement définissable ce qui rend sa traduction en stratégies de gestion des risques limitée. Les gestionnaires et aménageurs pointent du doigt son manque de clarté (Figure 26) et son abstraction. La conséquence est que la résilience reste parfois au niveau des discours politiques et est encore trop peu intégrée aux politiques, stratégies et outils de gestion des risques (Quenault, 2013).

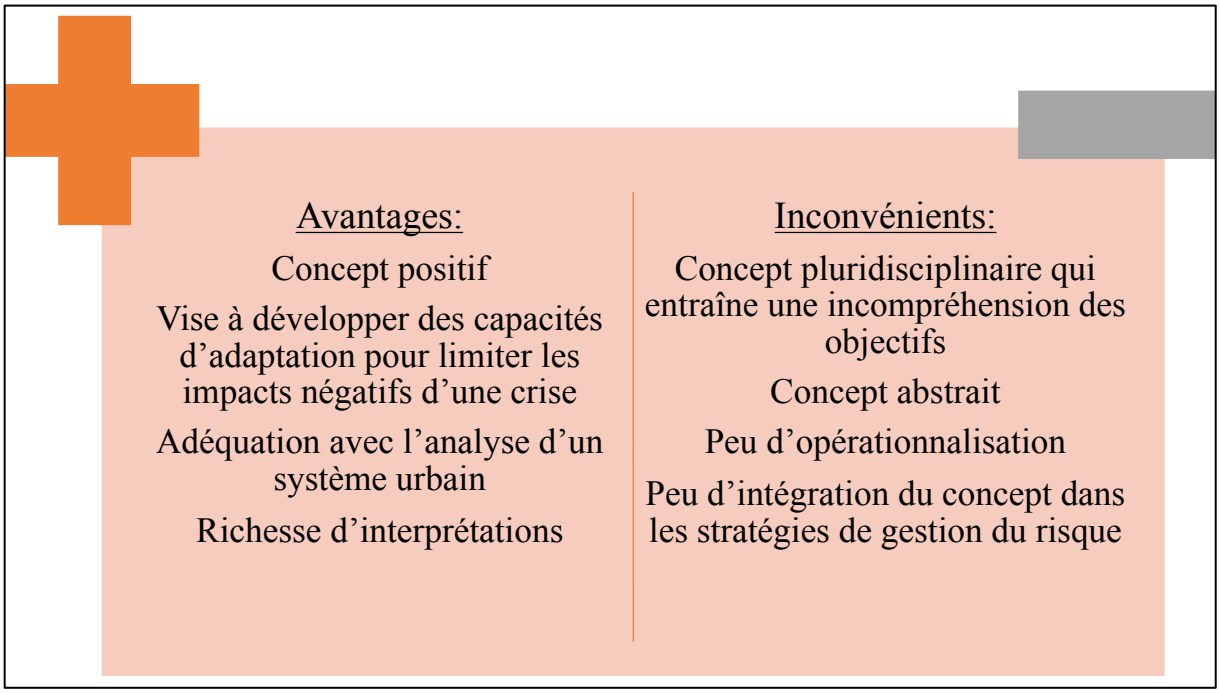

Figure 26 : Apports et limites du concept de résilience

La résilience dans la gestion des risques date du début des années 2000. Ce concept tend à répondre aux limites de la vulnérabilité pour développer des capacités d'un territoire pour absorber les effets négatifs d'une perturbation, maintenir ses caractéristiques et relancer une activité par la suite. Malgré la richesse d'interprétations et l'impact positif que peut avoir la résilience dans la gestion des risques, le concept de résilience est encore très limité dans son opérationnalisation. Les multiples définitions et approches qui abordent la résilience alimentent le flou du concept. Il est donc nécessaire de dépasser le concept pour le traduire en stratégie d'aménagement.

3. Synthèse

Depuis quelques années, on assiste à l'échelle internationale à une augmentation notable des catastrophes liées au changement climatique. Ces catastrophes, observées à l'échelle mondiale, se concentrent principalement autour des aires urbaines. Les aires urbaines sont simultanément fragilisées par la concentration croissante des enjeux urbains (enjeux humains, politiques, économiques, sociaux, démographiques, etc.). Cette augmentation des risques et de la population urbaine aboutit à de « nouveaux risques », par leur fréquence, leur impact et leur nature. Le risque inondation apparaît comme le plus dommageable, tant en impact humain qu'économique, pouvant atteindre 100 milliards d'euros/an de dommages à la fin du siècle. Or, aucune des stratégies classiques de gestion des risques ne peut répondre durablement à l'enjeu de l'augmentation des risques en milieux urbains et plus particulièrement au risque d'inondations urbaines. Les experts, scientifiques et acteurs locaux, doivent donc changer de paradigme et trouver une approche plus pertinente afin de limiter les impacts négatifs du risque inondation.

La résilience urbaine semble être une réponse appropriée aux incertitudes liées à l'augmentation des risques en milieux urbains. Elle offre un cadre d'actions suffisamment flexible pour encourager l'innovation sous toutes ses formes. Cependant cette flexibilité, cette richesse d'interprétation, en vient à desservir le concept dans son application concrète. Peu de gestionnaires, de décideurs, d'acteurs urbains utilisent ce concept afin d'influencer leur mode d'action sur le territoire. C'est pourquoi certains chercheurs se sont penchés sur la difficulté à opérationnaliser le concept. Mais certaines limites sont observables et notables dans les méthodologies existantes.

⇒ Nous nous proposons donc d'approcher la résilience urbaine en ***abordant les composantes urbaines, techniques et sociales afin de répondre aux mieux à la complexité du territoire urbain et aux attentes et interrogations des gestionnaires***.

⇒ Nous retiendrons donc l'idée que la ***résilience urbaine incarne les aptitudes et capacités d'une ville et de sa population à mettre en place avant, pendant et après un événement perturbateur de façon à en limiter les impacts négatifs.*** Ce positionnement scientifique permet donc d'analyser la résilience urbaine comme un continuum, mettant en avant des capacités proactives que le système urbain doit développer de façon à (ré) agir face à la catastrophe.

4. Objectifs de la recherche

L'objectif de cette recherche est de proposer une approche visant à répondre au manque d'opérationnalité du concept de résilience pour la gestion du risque inondation. Si en Europe certaines recherches ont été réalisées pour tenter d'opérationnaliser le concept de vulnérabilité via des indicateurs (Opach and Rød, 2013), peu encore parlent de résilience. Si certaines le font (Lhomme et al., 2013; Suárez et al., 2016), c'est essentiellement la résilience technico-organisationnelle qui est étudiée, mais sans prendre en considération la dimension sociale du territoire. En outre, les échelles d'analyse et d'intervention ne facilitent pas toujours la prise de décision.

⇒ Cette recherche vise à ***opérationnaliser le concept de résilience à l'échelle communale via la conception d'un système spatial d'aide à la décision, afin d'analyser les composantes urbaines, techniques et sociales du territoire.***

⇒ L'objectif est donc ***d'évaluer la résilience urbaine face au risque inondation. Ce travail vise à proposer une clef de lecture de la résilience urbaine en modélisant des indicateurs afin de co-concevoir un système spatial d'aide à la décision.***

L'originalité de la méthodologie s'appuie sur une approche collaborative, caractérisée par un partenariat socio-économique avec la Ville d'Avignon et le Service SIG (Système d'Information Géographique). Associant les expériences des gestionnaires, acteurs locaux et des avancées scientifiques, la démarche tend à répondre aux enjeux et limites du concept de résilience urbaine face au risque inondation. Co-conçu, l'outil d'aide à la décision est testé sur le territoire avignonnais afin de répondre à la situation croissante du risque inondation.

5. Structure du mémoire de thèse

Cette recherche s'est construite sous la forme d'une thèse sur articles pour plusieurs raisons. Tout d'abord dans le contexte actuel de valorisation des productions scientifiques, la thèse de doctorat par articles est une alternative intéressante pour présenter les contributions tangibles à l'avancement des connaissances dans la discipline. La réalisation d'une thèse par articles semble, par là-même, favoriser la diffusion plus « directe » des résultats de recherches. Ce constat s'adapte parfaitement à la construction même du projet de thèse. Cette thèse a été entièrement financée par la région Provence Alpes Côte d'Azur (PACA) d'octobre 2016 à fin septembre 2019, financement qui s'explique notamment par les domaines d'intérêt de la région PACA. En effet, la région PACA subit chaque année des événements liés aux débordements de

cours d'eau. Chaque événement pose la question de la stratégie territoriale vis-à-vis d'événements qui sont (ou seront), de plus en plus intenses et récurrents selon les prévisions du GIEC. Or, élus, responsables et décideurs locaux sont parfois démunis sur les stratégies de territoires à développer à la fois à court et long terme. Dans le même temps, les opérations d'aménagement se poursuivent dans des territoires à risques, mais sans nécessairement développer des stratégies de gestion. Étant donné le contexte régional lié au risque inondation et aux enjeux fonciers, il est urgent que les décideurs locaux et les professionnels de l'aménagement puissent dès lors intégrer des stratégies de résilience dans leurs perspectives territoriales. L'outil développé dans cette thèse vise donc à fournir un support de discussion autour des thématiques de risques et de résilience.

Au-delà du financement de la Région PACA, un partenariat socio-économique a été développé avec la Ville d'Avignon. Ce partenariat s'est traduit notamment par un échange de données nécessaires à l'étude du territoire et à un soutien quotidien à l'élaboration, à l'intégration et aux traitements des données géographiques. L'intérêt de la Ville pour ce travail s'explique par sa situation géographique, à la confluence du Rhône et de la Durance. La majeure partie de ce territoire est soumis à l'influence de ces deux cours d'eau et a déjà subi de nombreuses inondations. La vie de la collectivité et des évolutions urbaines est totalement conditionnée par cet environnement critique. Le fait de pouvoir offrir des outils d'aide à la décision pour intégrer la résilience urbaine a plusieurs atouts comme permettre de fournir des connaissances précises sur le territoire ainsi, que participer à la préparation et l'anticipation de la ville de demain.

Outre cet accompagnement de la part de la région et de la Ville, la thèse a été labellisée par le cluster SAFE (*Security and Aerospace actors for the Future Earth*). L'objectif de ce cluster est d'imaginer et de construire des solutions innovantes pour la sécurité des populations et de l'environnement. Un de leur programme vise à créer un cadre de collaboration entre les institutions, la sphère économique et la recherche pour favoriser le développement d'innovations au service de la résilience des territoires et leur intégration dans les cultures. Cette thèse est donc soutenue par le pôle « Villes et Territoires Résilients » de ce cluster.

Enfin la thèse, réalisée à 67% à Avignon Université, a été construite en co-tutelle avec l'Université de Mons et plus précisément la Faculté d'Architecture et d'Urbanisme de Mons (33% de la thèse effectuée à la FAU). Cette co-tutelle fait suite à une longue collaboration autour des thématiques communes de risques, de résilience, de vulnérabilité et d'espaces urbains. Cette année de co-tutelle a permis de de bénéficier de points de vue extérieurs, d'une approche innovante et d'une équipe internationale.

Pour toutes ces raisons et par l'objectif et les perspectives de recherche, cette thèse s'inscrit dans une démarche de recherche-action ou de recherche intervention. La recherche intervention « *accélère et diversifie les modes de diffusion des connaissances par la proximité des logiques d'intervention qui multiplie les chances et les formes de diffusion* » (Mérini and Ponté, 2008). Or, cette recherche s'inscrit pleinement dans une démarche de recherche-intervention car elle souligne à la fois un besoin précis (manque d'outils d'aide à la décision concernant la résilience urbaine) et met en interrelation les différents acteurs via une structure

de partage de connaissances ou de matériels. Pour s'adapter le plus possible à la genèse de cette thèse, mais aussi à ses objectifs finaux, il était nécessaire de questionner le processus d'écriture. Le processus d'écriture est un « *acte qui engage le scripteur en tant que sujet intellectuel et affectif, et d'une activité sociale soumise à des jugements qui s'exercent sur le produit de cette activité* » (Plane, 2006). Pour assumer tant le produit définitif que le processus d'écriture, il faut donc créer un support qui incarne le processus long de la thèse, à la fois dans les exigences professionnelles que personnelles. S'adapter à ces différentes collaborations (Région, Ville, Cluster) et aux acteurs du territoire était essentiel dans la réflexion du produit de thèse. Ce choix de thèse sur articles souligne donc l' « *activité sociale* » de la rédaction (Plane, 2006). L'objectif d'une recherche-action est non seulement de débroussailler une thématique théorique (la résilience) mais aussi accompagner les acteurs vers la traduction du concept en prise de décision. L'intérêt immédiat d'un article est de fournir de manière accélérée et souvent plus claire les résultats et réflexions autour du concept. C'est donc une forme de garantie quant à la compréhension et la réutilisation du travail effectué au cours de ces trois dernières années. En ce qui concerne la motivation personnelle, celle du « *scripteur* » (Plane, 2006), la dynamique de la thèse s'est appuyée sur le travail de communication et d'échanges. Pour paraphraser Umberto Eco (Eco and Cantagrel, 2016) écrire une thèse dans laquelle on ne se reconnaît pas peut conduire à devenir à moitié fou. En revanche, vivre la thèse comme un processus plein d'enseignement, une chasse au trésor et non pas un rite moyenâgeux ou masochiste, conditionne la réussite et la satisfaction face à sa production. Au cours de cette thèse, consciente de la mission du chercheur en tant que vecteur de communication, d'enseignement, et d'accompagnement, un point d'honneur a été porté sur la valorisation à tous les échelons à travers des conférences internationales (10 conférences à l'étranger), nationales (5 conférences) mais aussi des événements de vulgarisation (6 événements de vulgarisation, un podcast et la publication d'un livre destiné au grand public (Heinzlef, 2019)) afin d'accompagner le grand public vers ces préoccupations de dérèglement climatique, de risques et de résilience. Pour souligner cette activité de partage des connaissances et adapter le produit final de thèse avec le déroulé de ces trois dernières années, la thèse sur articles semble dès lors davantage répondre aux attentes et objectifs.

Ce mémoire se compose de cinq parties, une première partie introductive (*Partie Introductive : La résilience urbaine en question : contexte, enjeux problématique de recherche*) développant les enjeux des risques et du concept de résilience (partie ci-dessus) puis une deuxième partie exposant l'état de l'art sur l'opérationnalisation de la résilience (*Partie 1 Etat de l'Art : Méthodes et outils pour évaluer, modéliser et opérationnaliser la résilience*). La partie 3 est destinée au positionnement scientifique de la thèse (*Partie 2 : Positionnement scientifique et méthodologique*). La quatrième partie, sous forme d'articles, expose la méthodologie d'opérationnalisation de la résilience urbaine et les résultats (*Partie 3 Résultats : Conception d'un système spatial d'aide à la décision pour opérationnaliser la résilience*).

Enfin, la cinquième partie est une discussion (*Partie 4 : Discussion*). Cette discussion exposera les avancées de cette recherche dans le domaine de l'opérationnalisation de la résilience et pointera certaines limites.

Partie 1

État de l'Art

Méthodes et outils pour évaluer, modéliser et opérationnaliser la résilience

Opérationnaliser la résilience est un sujet complexe, voire conflictuel. Du fait de son origine pluridisciplinaire, et de la multitude d'approches, les interprétations de la résilience et son opérationnalisation sont parfois contradictoires (Quenault, 2013). Cette contradiction tient essentiellement du fait que la résilience appartient à de nombreuses disciplines, la physique, la psychologie, l'écologie ou encore la gestion des risques. Ce flou disciplinaire et conceptuel rend complexe l'utilisation de la résilience et son intégration dans des stratégies de gestion des risques (Dauphiné and Provitolo, 2007). Le concept de résilience est confronté à un problème de formalisation ce qui rend difficile son passage de la théorie à la pratique (Djament-Tran et al., 2011). Malgré son succès grandissant, la pertinence opérationnelle du concept est donc en permanence remise en doute et questionnée (Dauphiné and Provitolo, 2004; Djament-Tran et al., 2011). Opérationnaliser la résilience passe nécessairement par sa (re)définition et son évaluation (Dauphiné and Provitolo, 2007). Il est donc nécessaire de produire des indicateurs adéquats afin « *d'objectiver la résilience* » (Djament-Tran et al., 2011). Or, comme chaque approche sur ce concept est différente, définissant la résilience comme, un processus, un état, une qualité ou un objectif, le terme de résilience est dès lors subjectivé par les utilisateurs. Comment donc opérationnaliser, et donc objectiver, le concept tout en gardant sa richesse d'interprétations ? Certaines approches associent également d'autres concepts comme la vulnérabilité (Burton et al., 1993). Selon certaines écoles la résilience est une des composantes de la vulnérabilité (Provitolo and Reghezza-Zitt, 2015) tandis que pour d'autres la vulnérabilité représente l'incapacité à faire face à un choc et est donc la contradiction de la résilience (Becerra and Peltier, 2009).

Cette difficile formalisation, liée à la multitude d'interprétations et d'approches, a pour conséquence un passage de la théorie à la pratique complexe. Pourtant, c'est le défi posé par toutes les études portées sur la résilience, afin d'utiliser ce concept pour construire des stratégies de gestion des risques adéquates. Plusieurs approches ont donc tenté de répondre à ces enjeux en proposant des méthodologies qui visent à opérationnaliser la résilience. Cette opérationnalisation se traduit par la conception d'outils de mesure de résilience, de systèmes spatiaux d'aide à la décision ou encore par des approches favorisant la collaboration entre experts et acteurs locaux. Nous analyserons dans cette partie certains de ces travaux, cadres, structures et méthodologies. Certains auteurs ont tenté de synthétiser tous les modèles existants (Constas et al., 2010; Schipper and Langston, 2015) mais la quarantaine de modèles évoquée (Bahadur et al., 2015) souligne la (sur)abondance des approches sur la résilience. Nous nous attacherons quant à nous à balayer les approches visant à l'évaluation de la résilience via la création d'indicateurs, les modèles proposant un cadre conceptuel ou des systèmes d'aide à la décision, puis les méthodologies visant à créer un travail collaboratif afin d'opérationnaliser la résilience.

1. Définir la résilience

Depuis une vingtaine d'années, la résilience s'est fait une place dans la gestion des risques (Dauphiné and Provitolo, 2007). Cependant, son usage multidisciplinaire en fait un concept polysémique et abstrait (Bahadur et al., 2010). Ce concept est aujourd'hui sur-utilisé, sollicité dans de multiples domaines et rattaché à de nombreuses notions (Emrich and Tobin, 2018). Du latin *resalire* (*re*, en arrière ; *salire*, sauter), le terme de résilience est utilisé pour la première fois pour illustrer l'idée de « rebondir » afin de désigner le bruit que fait l'écho en « rebondissant ». Le premier sens, donné par la langue anglaise, du mot résilience, signifie donc « rebondir », « se redresser ». En français, le sens du mot a évolué au cours du Moyen Âge en prenant le sens de « *se rétracter, se dégager d'un contrat par une sorte de saut en arrière* » (Tisseron, 2015). C'est néanmoins le sens du terme anglo-saxon qui perdure aujourd'hui. Paul Claudel a défini au détour d'une phrase, ce qu'il fallait comprendre par le terme résilience ; *« il y a dans le tempérament américain une qualité, qu'on traduit là-bas par le mot de resiliency pour lequel je ne trouve pas en français de correspondant exact, car il unit des qualités d'élasticité, de ressort, de ressources et de bonne humeur* » (Claudel, 1965). Certaines premières traductions françaises ont tenté de définir la résilience par le terme de résistance, mais du point de vue de l'étymologie, cette comparaison n'a pas lieu d'être : la résistance fait référence à la capacité à être droit, à se tenir droit (*stare*) alors que la résilience est la capacité à rebondir (*salire*) (Tisseron, 2015). La racine latine indique assez clairement l'interprétation du terme : la capacité à délier/atténuer les impacts d'un traumatisme (Tisseron, 2015). Cependant, au vu des nombreuses définitions et champs d'utilisation (Figure 27), il serait plus juste dans un premier temps de parler *des* résilience*s* que de la résilience (Tisseron, 2015).

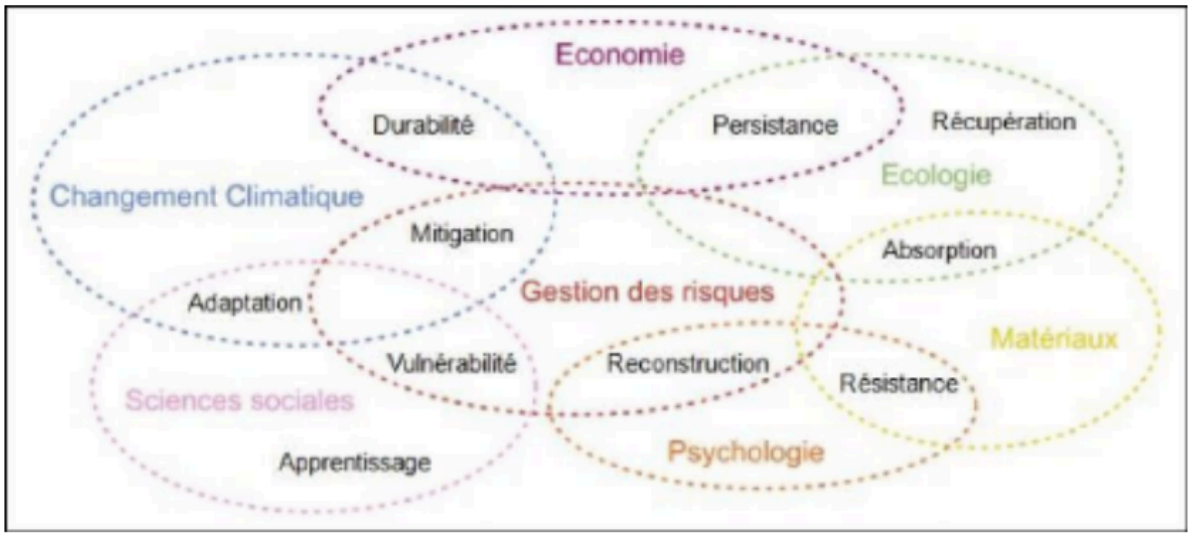

Figure 27 : Les différents domaines d'utilisation de la résilience (Lhomme et al., 2010)

Cette multitude de « résiliences » s'explique par ses origines mais aussi ses usages divers et variés. Chaque acteur peut apposer sa définition au terme de résilience (Meerow et al., 2016). Cette richesse d'interprétation en fait aussi sa faiblesse, ce qui explique que la traduction de ce concept en stratégies d'action est difficile et laborieuse.

1.1. La résilience, un concept avec des origines multiples

D'un concept novateur à un mot « fourre-tout », la résilience est à la fois une source d'enrichissement, d'apprentissage, d'amélioration comme un mot abstrait que peu d'acteurs comprennent et intègrent dans leurs stratégies de gestion des risques. C'est pourquoi il est nécessaire de comprendre les différentes définitions, et donc interprétations, qui sont liées à ce concept. Si l'interdisciplinarité peut servir et enrichir la compréhension de la résilience, elle peut aussi la desservir quant à son passage à l'opérationnalisation.

1.1.1. La résilience en physique

La première utilisation du concept de résilience dans les sciences s'observe dans le domaine de la physique. Figurant dans l'ouvrage Traité pratique sur la solidité de la fonte et d'autres métaux (1824) de Thomas Tredgold, la résilience fait référence à l'élasticité et à la résistance des matériaux (Ionescu, 2012). Il fait notamment référence au rapport de l'énergie cinétique absorbée nécessaire pour provoquer la rupture d'un métal et donc à la capacité de ce-dit métal à résister au choc en gardant sa forme initiale (Koffi, 2014). A la suite d'une pression continue d'un matériau sous l'effet d'une contrainte, le retour à l'état initial de celui-ci est le phénomène de la résilience physique. C'est donc une capacité intrinsèque – mesurable- que représente la résilience.

> ***La résilience en physique fait écho à la résistance d'un matériau. Elle souligne la capacité d'un élément à garder ses caractéristiques et ses fonctions initiales malgré un choc.***

1.1.2. La résilience en psychologie

La résilience psychologique se définie comme la capacité d'un individu à s'adapter face à une tragédie, un traumatisme, une perturbation, des menaces ou des situations de stress (Booth and Neill, 2017). L'idée est de dépasser la situation difficile. Plusieurs approches se sont suivies, certaines définissant la résilience psychologique comme une qualité personnelle, d'autres comme un processus ou encore comme une aptitude, une force ou une aspiration que chaque individu possède (Barroca, 2018).

Entre les années 60 et 90, la résilience psychologique faisait référence à une construction psychologique saine malgré des facteurs de risques tels que une situation familiale ou un environnement stressant et angoissant (Werner, 1995). Plusieurs éléments étaient étudiés :

- Un développement individuel « sain » malgré une situation de risque élevé ;
- Le développement de compétences malgré la présence de stress ;
- Le rétablissement après un traumatisme.

La définition établie aujourd'hui est que la résilience représente une adaptation positive malgré l'adversité (Luthar et al., 2000). L'adaptation peut être définie d'importante ou/et de positive en fonction de la situation (Luthar, 2015). Dans ce cas, la résilience n'est pas mesurée directement mais est déduite des actions des individus et des preuves de l'adaptation. Dans cette approche, le risque ou le stress est nécessaire pour mettre en évidence les capacités de résilience. La résilience se distingue donc d'un développement normal, c'est à dire d'une évolution individuelle ne subissant aucune perturbation (Rutter, 1987, 1999; Rutter and Zigler, 2000).

Introduite en France par le neuropsychiatre Boris Cyrulnik, la résilience psychologique tend à définir le fait de « *ne plus être prisonnier d'un passé, de s'en dégager. La résilience n'a rien à voir avec une prétendue invulnérabilité ou une qualité supérieure de certains, mais avec la capacité de reprendre une vie humaine malgré la blessure, sans se fixer sur cette blessure*» (Cyrulnik, 2004). La résilience psychologique désigne la capacité intrinsèque d'un individu (ou d'une communauté) à retrouver un état d'équilibre, soit par son état initial récupéré, soit par un nouvel état d'équilibre. Résilient ne rend pas invulnérable et malgré l'irréversibilité, le traumatisme reste réparable. Cependant, les traces subsistent et font partie intégrante de l'identité du système psychologique.

L'injonction derrière ce terme est avant tout de positiver et d'utiliser tous les moyens à disposition de l'individu pour améliorer sa qualité de vie. Aux États-Unis se terme peut être associé au concept d'*empowerment*, c'est-à-dire de rendre *« quelqu'un de plus fort, de le rendre capable de réaliser des choses qu'il ne faisait pas avant, de l'habiliter* » (Ionescu, 2012). Pour conduire à cette transition, l'identification des forces effectives ou potentielles, des ressources internes, externes, des capacités à développer, sont des étapes essentielles.

Plusieurs éléments participent au développement d'une conscience résiliente et positive, éléments faisant partie de l'environnement et des ressources de chaque individu (Lecombe, 2006). Un individu ne peut espérer être résilient que s'il apprend à affronter le milieu dans lequel il évolue et à terme à fonctionner et à investir dans ces milieux (Robinson and Carson, 2016). La résilience peut dès lors être définie comme un « *processus résultants des interactions entre l'individu et son environnement, processus lui permettant de faire face à des situations à caractère traumatique (…) ou à des situations stressantes* » (Ionescu, 2012). Plusieurs facteurs (Tableau 2) ont été identifiés pour aider un individu à développer des capacités de résilience (Fleming and Ledogar, 2008).

Ressources	Mécanisme
Niveau individuel	
Résilience intrinsèque	Tempérament positif
Sociabilité	Capacités sociales pro-actives, échanges avec autrui, attaches aux autres
Intelligence	Accomplissement académique, capacité à prendre des décisions
Capacités de communication	Langage développé, Capacités d'écriture et de lecture
Capacités personnelles	Tolérance, efficacité, estime de soi, self-control, sens de l'humour, espoir, stratégies internes de gestion du stress, apprentissage de ses expériences
Niveau familiale	
Éléments de soutien	Soutien, aide et chaleur humaine de la part des parents, cohésion au sein de la famille, relation étroite entre individus, valorisation des capacités individuelles des uns et des autres
Statut socio-économique	Ressources matérielles
Niveau communautaire	
Expériences scolaires	Influences positives des enseignants, succès académique ou autre
Éléments de soutien	Soutien individuel, absence de punition, ressources et valeurs de la société
Ressources culturelles	Activités traditionnelles et spirituelles

Tableau 2 : Ressources individuelles, familiales et communautaires pour développer un processus de résilience (Fleming and Ledogar, 2008)

> ***La résilience en psychologie définie les éléments liés à l'individu, à son cercle familial et à la communauté dans lequel il évolue, qui l'aident à se remettre d'une perturbation. La résilience psychologique ne veut pas nécessairement dire de revenir à un été initial mais de se remettre et surmonter du choc. Nous retiendrons l'idée que la résilience passe par l'identification des forces effectives et/ou potentielles et des ressources internes et externes.***

1.1.3. La résilience en écologie

En 1973, Holling définit la résilience comme la capacité d'un éco « *système à conserver sa structure qualitative* » (Holling, 1973). Cette définition met en avant la capacité d'un système à absorber un choc sans pour autant changer de comportement, de fonction. C'est donc avant tout la notion de persistance qui est mis en avant (Koffi, 2014). L'idée est que le système a une évolution constante (Kane and Vanderlinden, 2015), caractérisée par des mouvements pendulaires vers l'état initial précédent la perturbation. Cependant l'idée qu'il n'existe qu'un seul et unique état initial d'équilibre pour tout élément a été largement critiqué, notamment lors des analyses de systèmes complexes caractérisés par leurs évolutions. C'est pourquoi plusieurs années après, Holling a évolué en introduisant une idée d'évolution sans s'appuyer nécessairement sur un retour à un équilibre préexistant. La résilience d'un écosystème peut dès lors être définie comme la capacité à absorber des perturbations tout en se réorganisant (Walker et al., 2004) dans un processus de rétroaction.

Gunderson et Holling (Chelleri, 2012) ont donc innové en utilisant le concept panarchique pour illustrer la dynamique et la dimension multi-scalaire de la résilience. Le modèle de *Panarchy* (Figure 28) met en place un cycle dynamique mêlant une phase de croissance (phase d'exploitation), de conservation (phase d'équilibre), d'effondrement (phase de libération) et enfin phase de réorganisation.

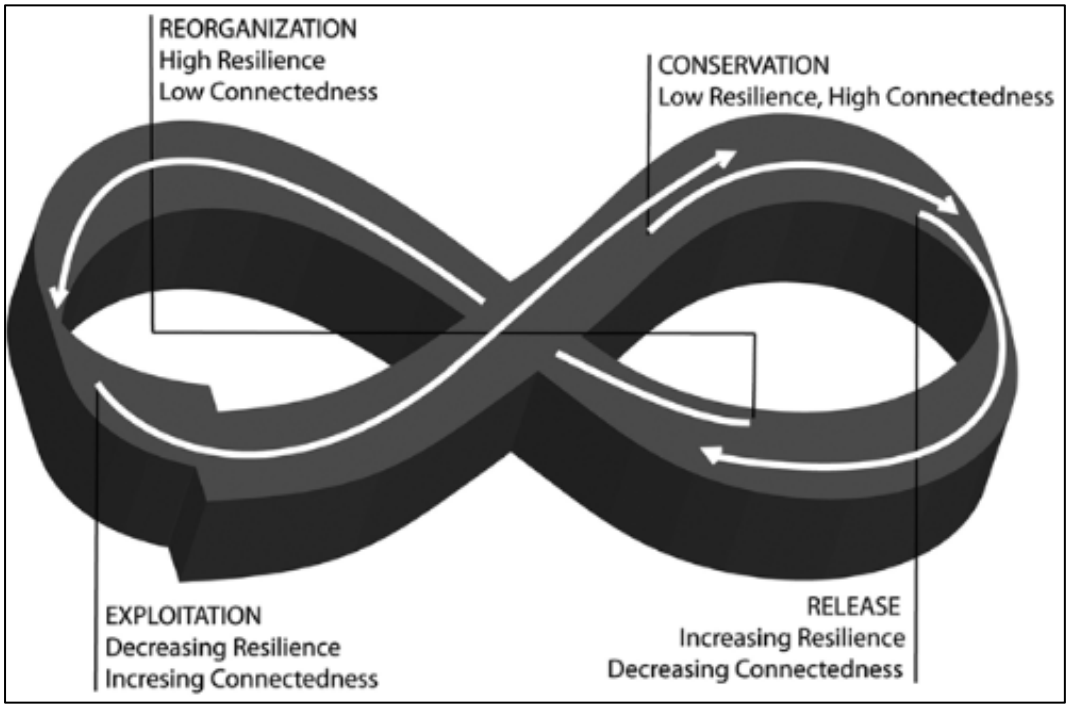

Figure 28 : Modèle de Panarchy de Gunderson et Holling (Chelleri, 2012)

La résilience en écologie fait écho dans un premier temps aux capacités développées par un système pour retrouver l'état d'équilibre préexistant à la perturbation. Cette définition a évolué pour intégrer la notion de réorganisation. Nous retiendrons l'idée qu'un système résilient doit retrouver un équilibre acceptable, préexistant ou non à la perturbation.

1.1.4. La résilience au croisement des disciplines pour une nouvelle gestion des risques

La catastrophe de l'Ouragan Katrina à la Nouvelle-Orléans en 2005 a marqué un tournant dans la gestion des risques (Campanella, 2006; Cutter et al., 2008a; Hernandez, 2010). Pour éviter qu'un événement pareil se reproduise, la gestion des risques a évolué en intégrant le concept de résilience. L'objectif est d'utiliser ce concept pour préparer au mieux les populations et territoires à l'augmentation des risques en milieu urbain. L'idée n'est plus d'analyser les risques de manière cloisonnée mais d'étudier l'événement perturbateur et ses conséquences dans sa globalité. Trois approches (Tableau 3) et méthodes se démarquent à l'heure actuelle (Folke et al., 2002; Folke, 2006; Folke et al., 2010).

Définitions	Caractéristiques	Qualité	Condition
Engineering	Temps de retour, efficacité	Récupération, stabilité	Recherche d'un état d'équilibre stable
Écosystémique	Capacité d'absorption et d'évolution	Persistance, robustesse, dynamique	Équilibres multiples
Socio-ecological	Interaction entre perturbation et réorganisation, maintien et développement	Capacité d'adaptation, transformable, apprentissage, innovation	Rétroaction intégrée au système

Tableau 3 : Synthèse des approches de résilience (Barroca, 2018)

- L'approche engineering suppose un état stable (Brand and Jax, 2007; Holling, 1973). L'idée est d'évaluer l'écart entre l'état perturbé et l'état d'équilibre et la vitesse de retour à un état d'équilibre après un perturbation. L'aléa représente ici un élément contre lequel il faut se protéger et éviter.

- L'approche écosystémique (Carpenter et al., 2001; Gunderson and Holling, 2002; Walker et al., 2004) n'induit pas l'idée d'un retour à un équilibre antérieur mais admet plusieurs états d'équilibres.

- L'approche socio-ecological se définie comme *« la capacité d'un système à absorber des perturbations et à se réorganiser tout en subissant un changement, de manière à maintenir encore globalement sa fonction, structure, et boucles de rétroactions, et par conséquent l'identité ; autrement dit, la capacité de changer afin de maintenir la même identité* » (Folke et al., 2010). Cette approche diffère des deux autres car, si elle intègre encore l'idée d'absorption des perturbations, elle intègre également les notions d'apprentissage, d'adaptation, d'auto-organisation.

Aujourd'hui, l'acceptation scientifique qui analyse la ville comme un système (Bretagnolle et al., 2006; Basu et al., 2019; Gardner, 2016; Ruth and Coelho, 2007), fait écho à l'approche systémique de la résilience. C'est pourquoi la résilience fait aujourd'hui partie de la panoplie de concepts utilisés dans la gestion des risques.

Présentée par les acteurs internationaux (UN General Assembly, 2015; United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), 2017) comme la clef de voute de la gestion des risques, la résilience est aujourd'hui une priorité d'action. La résilience urbaine se définie comme la capacité d'un système urbain à s'adapter aux perturbations. Elle représente donc le nouveau paradigme de la gestion des risques qui permet d'atténuer l'impact négatif d'une perturbation. La résilience urbaine conduit à la création d'une ville plus durable (Balsells, 2015; Serre et al., 2013). Ce modèle met en avant l'idée que la perturbation – ou choc – n'est pas (ou plus) nécessairement quelque chose de négatif mais participe pleinement à la construction d'un nouveau modèle en appuyant l'idée d'innovation, d'apprentissage, de rebond et de changement. L'étymologie latine du terme résilience (*re*, en arrière ; *salire*, sauter) souligne cette capacité à dépasser une crise. C'est ainsi une capacité proactive que doit développer le système, de façon à (ré)agir face à la catastrophe et développer des capacités *« (d') apprentissage et (d')anticipation »* (Dauphiné and Provitolo, 2007). Le système altéré doit donc se montrer capable d'évoluer, de s'adapter et de rétablir ou maintenir un équilibre de fonctionnement (Barroca et al., 2012). La résilience possédant un « *arc-en-ciel de sens* » (Provitolo, 2009), elle fait référence tout autant à une capacité de résistance, qu'à une capacité d'absorption et de récupération (Serre, 2016), à une capacité d'apprentissage (Vale and Campanella, 2005; Zevenbergen, 2016), ou encore à une capacité d'adaptation.

Quelle que soit la définition que l'on place derrière ce terme, celle-ci renvoie toujours à un retour à un équilibre acceptable, qu'il soit antérieur au choc ou un nouveau fonctionnement (Dauphiné and Provitolo, 2004). C'est donc une notion qui renvoie à une innovation technique, urbaine, sociale, architecturale, économique et politique et qui enjoint une remise en question de nos systèmes de gestion du risque. Cette injonction à l'innovation s'adapte parfaitement à la complexité urbaine, économique, politique, sociale, écologique du monde contemporain. De ce fait le concept de résilience s'intègre aux enjeux d'étalement urbain et aux risques associés.

> ***La résilience est un concept pluridisciplinaire et complexe à définir. Souvent considérée comme un arc-en-ciel de sens, la résilience est perçue comme le nouveau test de Rorschach, c'est à dire un concept sur lequel chaque acteur pourrait projeter son interprétation. Appartenant à la fois à la physique, à la psychologie, à l'écologie et à la gestion des risques, la résilience renvoie à des notions d'équilibre, de rebond, de redressement, d'innovation, d'adaptation et d'apprentissage.***

1.2. La résilience et/ou la vulnérabilité ?

1.2.1. Une opposition des concepts discutable

L'évolution dans la gestion des risques entre le concept de vulnérabilité et le concept de résilience a été exposée dans la *Partie Introductive*. Nous venons à nous questionner aujourd'hui sur l'utilité de cette dichotomie entre les deux concepts.

Pour de nombreux chercheurs, la vulnérabilité et la résilience sont opposées. Pour certains cette opposition repose sur le fait que la vulnérabilité possède un sens négatif et qu'il serait nécessaire de la diminuer, tandis que la résilience a une connotation positive qu'il faut tendre à augmenter (Pelling, 2003). Pour d'autres, la résilience et la vulnérabilité sont simplement en opposition, le contraire l'une de l'autre. La résilience serait donc un outil pour diminuer la vulnérabilité (Folke et al., 2002).

Pourtant cette mise en opposition a été largement contestée (Provitolo, 2009). Tout d'abord, comme évoqué dans la *Partie Introductive*, la vulnérabilité sociale traduit la capacité à faire face, à anticiper et à s'adapter aux risques (D'Ercole et al., 1994). Ces capacités sociales sont en grande partie intégrée à la notion de résilience (Cardona, 2004). La résilience peut donc être perçue comme un élément intégrant le concept de vulnérabilité (Britton and Clark, 2000). On ne peut donc pas complètement opposer les deux concepts. Concernant le positionnement visant à qualifier le concept de vulnérabilité de « négatif », la vulnérabilité « positive » apporte un contre-argument. On considère que la vulnérabilité est positive lorsqu'elle entraîne un changement qui apporte une transformation bénéfique (Gallopín, 2003). Par exemple dans une situation de vulnérabilité d'un système politique dictatorial, son effondrement est positif. Voir l'effondrement ou la paralysie d'un système urbain suite à une inondation peut produire une prise de conscience et permettre d'évoluer vers un fonctionnement plus adapté. Dans ces conditions, la vulnérabilité et la résilience ne sont plus en opposition mais font partie d'un tout. On peut alors les aborder selon un continuum. Cette nouvelle prise de position amène la notion de vulnérabilité résiliençaire (Provitolo, 2009, 2012). Cette notion traduit l'idée que *« la vulnérabilité peut être traversée et modifiée par la résilience considérée sous un angle global, à savoir que cette résilience peut, d'une part, être directement liée à la vulnérabilité à laquelle elle s'applique et d'autre part, avoir un effet positif ou négatif selon l'échelle à laquelle l'on étudie le système* » (Provitolo, 2009).

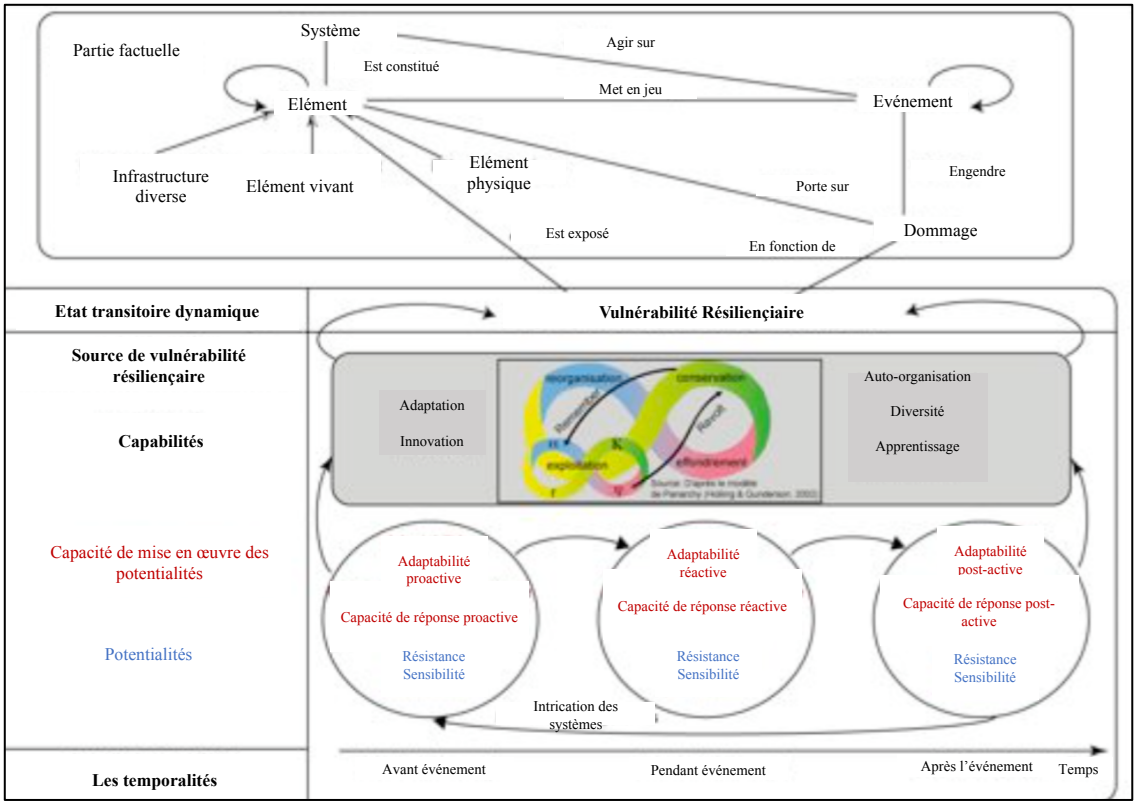

Figure 29 : La vulnérabilité résiliençiaire (Provitolo, 2009)

Pour conclure, la résilience et la vulnérabilité ne sont pas opposées de façon dichotomique. Les deux concepts s'adaptent tout autant à des systèmes techniques et/ou sociaux. La résilience et la vulnérabilité se recoupent dans leur approche des systèmes pour apporter une vision exhaustive des éléments composants celui-ci. Aborder les deux concepts conduit à analyser la question des risques sur le long terme. Il est nécessaire d'apprendre à vivre avec le changement et l'incertitude et ne pas chercher une maîtrise à court terme des risques. Analyser conjointement les deux concepts revient à apprendre des crises (approche de la vulnérabilité) et innover pour s'adapter aux risques (résilience).

> ***La résilience et la vulnérabilité ne sont plus nécessairement opposés dans l'approche des risques. Il est nécessaire d'aborder les deux concepts selon un continuum, l'un faisant partie intégrante de l'analyse de l'autre. Agir sur l'espace urbain nécessite de prendre en compte les deux aspects pour, à la fois, apprendre des catastrophes passées et innover pour se préparer à l'augmentation des risques.***

1.2.2. Quelle temporalité de résilience ?

Selon la définition énoncée de la résilience urbaine, la résilience caractérise la capacité des systèmes urbains à s'adapter à une perturbation (Brand and Jax, 2007). L'adaptation passe par des phases d'apprentissage (Vale and Campanella, 2005; Zevenbergen, 2016). La résilience n'est donc plus à étudier uniquement post-crise. En effet, certaines conséquences négatives d'une perturbation sont exacerbées par des fragilités intrinsèques au fonctionnement du système urbain. Étudier la résilience sur un long pas de temps prend alors tout son sens. La perturbation est donc un élément qui souligne les vulnérabilités intrinsèques du système urbain mais aussi ses capacités à se relever. La perturbation peut donc être interprétée comme une opportunité pour transformer les systèmes urbains en territoires résilients (Pasche and Geisler, 2005).

Aborder la résilience selon un temps long permet également d'intégrer la vulnérabilité dans l'approche du prisme de résilience (Figure 30).

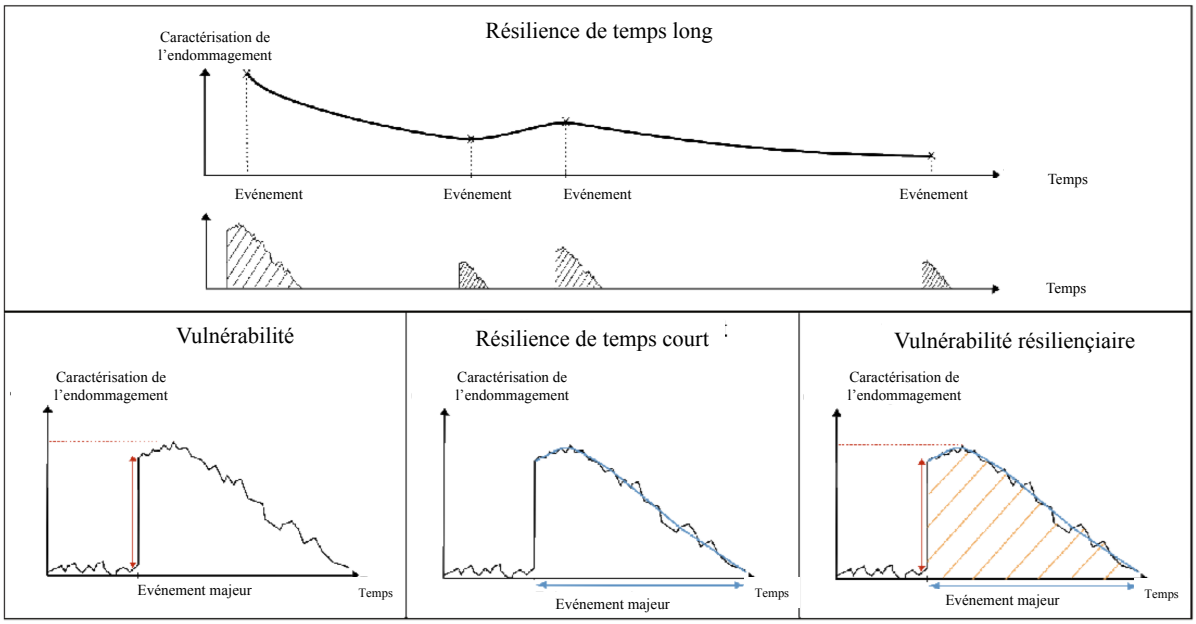

Figure 30 : Le processus de résilience (Serre, 2011)

Les concepts de résilience et de vulnérabilité doivent être analysés en interaction continuelle afin d'analyser de façon exhaustive l'entité urbaine. Pour se faire, l'analyse doit s'envisager sur une temporalité longue afin de pouvoir identifier les éléments qui favorisent ou non une démarche de ville résiliente. Étudier les composantes vulnérables du système urbain permet d'apprendre des erreurs d'aménagement et de gestion des risques afin de tendre vers la construction d'une ville plus résiliente.

1.3. Des villes résilientes

1.3.1. La résilience urbaine

Nous avons démontré précédemment les enjeux croissants des aires urbaines, tant par des enjeux urbanistiques, sociaux que climatiques. L'augmentation des catastrophes, combinée à une concentration des enjeux a entraîné une augmentation considérable des pertes matérielles, immatérielles et humaines. Ces pertes sont à la fois la résultante d'une augmentation en termes de fréquence et de puissance des catastrophes naturelles, mais également de l'exposition des populations, biens et infrastructures. Dans le chaos de ces incertitudes croissantes, le concept de résilience apparaît comme une approche intéressante pour favoriser les réponses des systèmes et des acteurs face aux enjeux des catastrophes naturelles (Fuchs and Thaler, 2018).
La résilience peut être définie comme :

⇒ La capacité des populations, territoires et infrastructures à mettre en place des ***ressources, aptitudes et capacités afin de vivre au mieux un événement perturbateur de façon à en limiter les impacts négatifs. Les capacités peuvent être à la fois matérielles (réseaux urbains, approvisionnement en ressources vitales, etc.) et immatérielles (connaissances du risque, dynamiques économiques, cadre institutionnel, etc.).***

La résilience urbaine peut donc être définie comme le concept qui étudie les systèmes urbains i.e. les interactions entre les différentes composantes qui participent à la création du territoire.

⇒ La résilience urbaine renvoie à **« *une approche systémique qui englobe les multiples couches (le bâti, le social, le politique…) et structures qui permettent de produire une vision intégrée de l'objet urbain*** » (Hernandez, 2010). La résilience urbaine serait donc un outil pour analyser la complexité du système urbain et définir les différentes capacités et capabilités de chaque élément qui définit ce système afin de vivre et survivre à un événement perturbateur.

Néanmoins, le champ scientifique n'offre pas une seule et même définition de la résilience urbaine, à la fois par le foisonnement de sens du terme de « résilience » mais également par la multitude de disciplines l'utilisant (Lhomme et al., 2010). Pour certains la résilience fait appel au concept de « *recovery* », c'est-à-dire de rebond (Hernandez, 2009), de reconstruction, de récupération que ce soit de la part des populations (Campanella, 2006) et/ou des constructions. Cette approche nécessitant d'intégrer la composante du choc et de dommages – l'on se reconstruit après impact- il est nécessaire d'accepter que le risque zéro n'existe pas. En d'autres termes, si le risque n'existait pas ou plus, le concept de résilience n'aurait également plus lieu d'être.

La capacité à définir ce qu'on entend par résilience est un prérequis essentiel afin de réduire les conséquences d'un désastre. Pour cela, déterminer les éléments « à risque » sur un espace précis est une étape essentielle. Mais lorsque l'on parle de résilience urbaine, tous les éléments ne sont-ils pas primordiaux ? Or, la plupart des recherches tournées vers l'opérationnalisation de la résilience sont centrées sur une approche technico-fonctionnelle. De ce fait, ce sont essentiellement les éléments techniques et matériels, tels que les réseaux urbains, qui sont analysés dans ces études (Gonzva, 2017; Lhomme, 2012; Toubin, 2014). Or, un système urbain est composé de multiples composantes en interactions en permanence.

> ***La résilience urbaine serait donc un outil pour analyser la complexité du système urbain et définir les différentes capacités et capabilités de chaque élément qui définit ce système afin de vivre et survivre à un événement perturbateur. Étudier la résilience urbaine nécessite donc de prendre en compte le système urbain dans sa globalité, afin d'analyser chaque composante.***

1.3.2. Le système urbain, un système complexe

La ville est un objet complexe à définir, décrire, analyser *« tant il est fait de multiples matériaux aux histoires rarement unifiées »* (Paquot, 2010). Les composantes urbaines sont diverses et les modèles peinent à analyser le système urbain. La croissance urbaine accompagnée d'évolutions urbaines, sociales, techniques, politiques, économiques conduisent à une fragmentation de l'espace urbain. Cette fragmentation et cette complexité croissante ne favorisent pas une vision et une connaissance globale et partagée de l'espace urbain ce qui complique la gestion des risques.

Depuis les années 70, la pensée systémique a émergé pour aborder les systèmes complexes (Morin, 2014). La difficulté de définir la ville comme objet souligne la complexité et suggère donc que l'on peut considérer la ville comme un système.

Un système peut être « *défini comme un ensemble d'éléments et d'interactions entre les éléments qui forme un tout organisé, l'organisation interne du système constituant sa structure et le comportement des éléments en interactions définissant sa dynamique* » (Lajoie, 2007). Chaque système est défini selon une finalité et un objectif.

Ce système urbain (Bretagnolle et al., 2006) est défini par les interdépendances existantes entre les diverses composantes de la ville, du fait des *« multiples réseaux de relations qu'elles ont entre elles »* (Pumain, 2014). L'approche systémique a pour objectif d'observer, interpréter, reconstruire le monde réel en émettant des hypothèses sur l'organisation des villes (Paulet, 2009). L'analyse d'un système est donc un construit et suppose des choix parmi les différentes variables du système. L'étude d'une ville sous-entend donc aujourd'hui de comprendre et de

prendre en compte les interdépendances entre les villes, leurs composantes, et d'analyser leurs connexions (Figure 31).

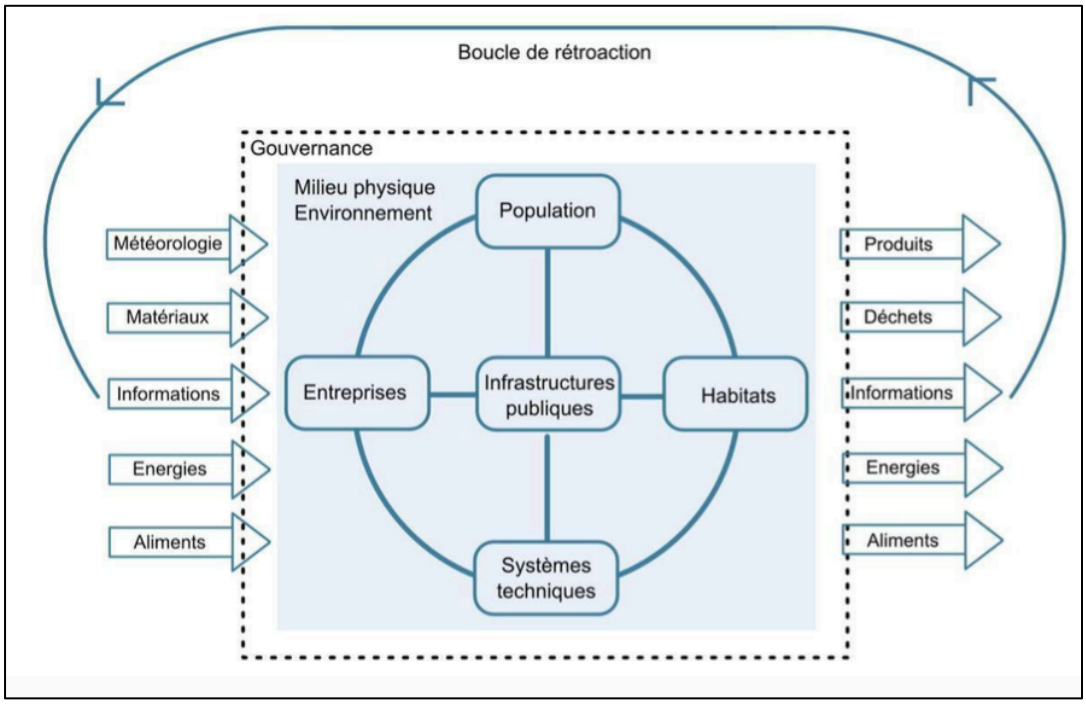

Figure 31 : Modélisation simplifiée du système urbain (Lhomme et al., 2010)

La ville crée donc en premier lieu des imbrications de composantes urbaines, tels que des systèmes techniques (comme les réseaux urbains et/ou infrastructures critiques) ou des infrastructures publiques (gouvernance, éducation, santé, police, justice, etc.) (Lhomme, 2012), mais elle crée également des interrelations avec son environnement, du fait de sa caractéristique de système ouvert (Lhomme, 2012). En tant que système ouvert, elle se transforme à la fois par elle-même à l'aide de capacités intrinsèques mais reçoit également des ressources via des flux et des informations de leur environnement (Figure 32). N'étant pas autosuffisante, les relations villes-campagnes, villes-villes, sont primordiales et doivent être analysées dans l'étude globale d'un système urbain. Ces interactions peuvent dès lors être considérées comme source de richesse, davantage de ressources (alimentaires), de connaissances, de techniques, mais également source de fragilités (incertitudes, surproduction de déchets, risques urbains nouveaux, risques sociaux, etc.). Cette liste non exhaustive permet néanmoins de comprendre la fragilité des milieux urbains, car dès lors leurs sources de croissance, d'expansion, de richesse peut, poussé à son paroxysme, être également synonyme de vulnérabilité.

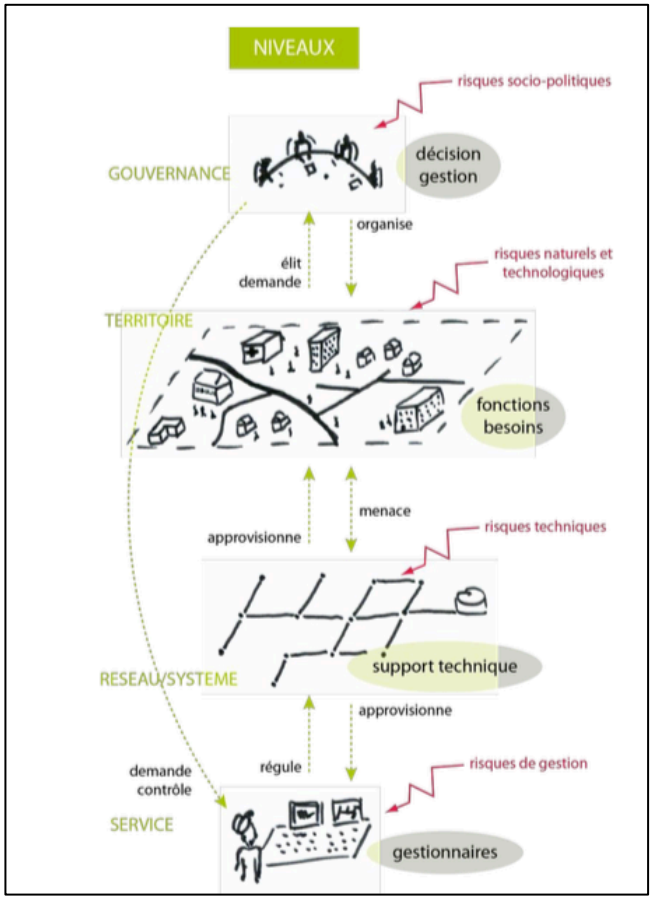

Figure 31 : Interactions entre les différents éléments et échelles spatiales d'un territoire urbain (Toubin, 2014)

La ville est donc un objet complexe à appréhender et à étudier. Du fait de sa construction protéiforme, la ville est difficile à définir et identifier comme un objet unique. Les évolutions sont constantes et varient en fonction des composantes sociales, urbaines, techniques, environnementales, politiques, économiques, etc., de l'espace urbain. Concentrant les enjeux mis à mal par le risque, les villes concentrent également les ressources pour y faire face. C'est donc dans ces espaces que doit s'analyser et s'opérationnaliser la résilience urbaine.

> ***Le système urbain est un système complexe qui dépend des multiples interactions des éléments urbains. La ville est un lieu d'interactions multiples, d'imbrications et d'interdépendances qui s'observent à différentes échelles spatiales. Espace de vulnérabilités mais aussi de ressources, la ville est un terrain propice pour développer des stratégies de résilience.***

1.4. Des aménagements résilients

1.4.1. Qu'est-ce qu'une ville résiliente ?

Dès lors, comment pourrait-on définir des villes résilientes et se pourrait-il que certaines existent déjà ?

Une ville pourrait être qualifiée de résiliente dès lors qu'elle existe toujours (Vale and Campanella, 2005). Analysée sous l'angle de la persistance, la ville doit dès lors être capable de perdurer au-delà des perturbations. A l'échelle du bâti, le Mausolée d'Auguste à Rome est un exemple pertinent. Tout d'abord érigé en tant que tombeau de la famille impériale, le monument fut de nombreuses fois ravagé. Transformé en jardin, en vigne, en amphithéâtre, en auditorium puis rénové, ce lieu défini la résilience voire la résistance. Pour perdurer, il a fallu se transformer et s'adapter. Si cet angle d'approche se défend, il faut néanmoins être conscient qu'il est dès lors nécessaire d'aborder un temps d'analyse long pour pouvoir étudier dans sa globalité les évolutions urbaines.

D'autres approches défendent l'idée qu'une ville résiliente est une ville reconstruite, c'est-à-dire qui aurait subi des dommages et qui s'en serait relevée. A l'inverse du « *recovery* », l'approche du « *rebuilding* » signifie reconstruire suite à des chocs extérieurs (Campanella, 2006). Des interrogations concernant les résidus des traumatismes peuvent alors être soulevées. Une ville résiliente doit-elle mettre en avant ces vestiges (ruines, destructions) ou bien reconstruire ? Auquel cas, reconstruire à l'identique du temps avant crise ou bien reconstruire d'une nouvelle manière ? *« Faut-il effacer la catastrophe pour revenir à un état antérieur, idéalisé de la ville, et/ou faut-il utiliser la catastrophe comme opportunité pour refaire une ville « meilleure » ?* » (Lhomme et al., 2012). Historiquement, le choix a été fait d'effacer les traces de ces blessures, atténuer le traumatisme pour tenter de se concentrer sur le lendemain (Le Blanc, 2012). Néanmoins, conserver les ruines, les lieux abîmés, permet de développer à travers la mémoire traumatique une conscience du risque, et par là même une gestion du risque (Le Blanc, 2010). Conserver la trace de la blessure participe dès lors à la prévention des risques futurs, via la mémoire, la transmission et l'apprentissage (Boito, 2000; Lacroix, 2007; Vallat, 2008). Les preuves visuelles participent à la construction du souvenir mais également à l'interrogation des citadins : qu'est-il arrivé ? Est-il possible que cela se reproduise (Hernandez, 2008)? J.B Jackson fait le lien entre la ruine et les rappels de factures impayées, considérant que de « *bonne ou de mauvaise grâce, nous attrapons notre carnet de chèque pour acquitter notre dû* » (Jackson and Marot, 2005). La ruine nous met alors face à nos propres responsabilités : qu'est-il possible de faire pour éviter qu'un tel événement ne se reproduise ? De la prise de conscience au sentiment de responsabilité naît la gestion des risques. D'un événement négatif, réactif (les ruines étant la résultante de la catastrophe), s'ensuit une réaction proactive (conserver pour mieux s'en prémunir).

Concernant le risque inondation, comment concilier la nécessité de se protéger avec le besoin de mémoire, de transformation et d'adaptation ? Tel qu'évoqué précédemment avec l'image des ruines, la ville résiliente aux inondations doit s'envisager sur le court et long terme.

Le temps court s'explique par la nécessité de proposer des solutions, des modélisations qui permettraient de créer des scénarios probabilistes et d'orienter la gestion des risques et des stratégies liées. Le temps long vise davantage à transformer la ville et son approche des risques, à rendre la ville plus adaptable, flexible, processus qui nécessitent des temps longs (Serre, 2011).

1.4.2. Des exemples de projets de résilience

La ville résiliente aux inondations doit intégrer tous ces éléments afin de préparer la ville et ses habitants à l'augmentation des inondations en milieu urbain. Plusieurs approches illustrent le besoin de concevoir une ville résiliente aux inondations, sur le temps long et le temps court.

- Concernant la temporalité « court terme », le projet européen FloodProBE[1] est un bon exemple. Ce consortium d'acteurs et d'experts a pour objectif de développer des technologies, méthodes, concepts et outils afin de rendre le bâti, les infrastructures et réseaux plus résilients au risque inondation (Escarameia and Stone, 2013). Si l'approche est essentiellement tournée autour de l'apport du génie civil dans l'amélioration de la résilience urbaine – et donc par là-même autour d'une résilience technico-fonctionnelle – il n'en est pas moins nécessaire d'analyser les capacités des villes à fonctionner en mode dégradé et au temps nécessaire à remettre en service tous les composants urbains. L'idée est davantage d'évaluer la capacité des ouvrages de protection (barrages, digues, levées, etc.) à être effectifs selon les concepts de résistance, d'absorption et de récupération (Lhomme et al., 2010 ; Serre, 2011).

- Le projet européen FloodResilienCity aborde quant à lui la résilience d'une façon plus organisationnelle, et de ce fait dans un temps d'action plus long. Visant une approche davantage holistique, le consortium de villes du Nord de l'Europe ont mis en place plusieurs objectifs définis comme étant les « 4-A » (Figure 33) ; *Awareness* (alerte et sensibilisation au risque), *Avoidance* (éviter l'augmentation des « faibles » risques), *Alleviation* (réduire les risques de façon structurelle ou non), *Assistance* (plan de secours). Cette approche tente d'aborder le risque dans un continuum avec les différentes étapes de préparation, absorption, résistance, apprentissage, transmission et rebond.

[1] http://www.floodprobe.eu/

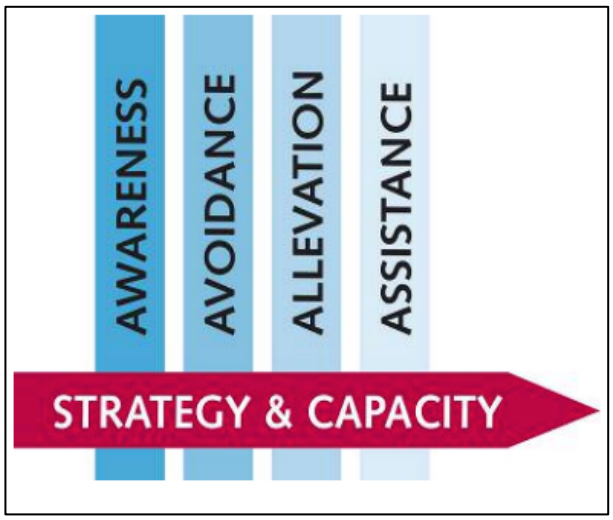

Figure 32 : L'approche intégrée du projet FloodResilienCity (Serre, 2011)

- Le concept « Flood Proof City » (De Graaf, 2013) s'inscrit dans cette approche « globale » de la résilience. Ce concept vise à développer des conseils visant à augmenter la réponse des villes face au risque inondation. Voici quelques exemples des actions à mener :

- (Ré) utiliser l'eau des inondations, tempêtes lorsque cela est possible. Ce conseil vise à répondre aux enjeux de la ressource en eau et surtout de son manque d'accessibilité. L'argument s'appuie sur le fait que la Chine et l'Inde auraient besoin de récupérer toute l'eau issue du ruissellement urbain pour répondre aux besoins en eau de l'agriculture et de l'espace urbain (Jury and Vaux, 2005) ;
- Augmenter les fonctions urbaines de l'eau. Ce conseil vise à augmenter les fonctions d'utilisation des espaces aquatiques, telles que de nouveaux lieux d'habitation grâce à des bâtiments flottants ;
- Faire participer les citadins. Les auteurs considèrent que l'échelle individuelle est nécessaire pour initier une transition dans la gestion des risques ;
- Rendre la gestion de l'eau et des risques davantage proactive, conduisant à des initiatives, des innovations. Avec cette vision, la question de l'eau peut être introduite dès le début des projets urbains ;
- Initier l'intégration d'une gestion des risques et de contrôle des inondations.

Ce projet vise à transformer la menace de l'eau en opportunité afin de répondre aux enjeux d'énergie, de ressource, et de nutrition.

1.4.3. Des exemples d'aménagements résilients

Au-delà de ces recherches menées sur la problématique de la ville résiliente, certaines approches ont tenté d'opérationnaliser le concept à travers des projets d'aménagement (Terrin, 2014) développant des capacités de résilience.

- Le quartier de Zollhafen à Mayence (Allemagne) est un projet de réaménagement d'une ancienne zone portuaire (Terrin et al., 2014). L'enjeu essentielle de ce quartier est qu'il est situé en dehors de la zone de protection des crues (Figure 34). Au lieu de choisir de déplacer le dispositif de protection, et risquer de détériorer la situation des habitants en aval, le choix a été fait de garder la composante inondable du quartier. Ici, la résilience se traduit par une adaptation des constructions à la situation de zone inondable. Dans le nouveau quartier, les voieries secondaires sont aménagées au niveau du sol mais la voierie principale est conçue pour faire face à un niveau de crue de probabilité annuelle 1/200 (Balsells, 2015). Cette précaution assure aux habitants une accessibilité dans tout le quartier par leurs véhicules mais permet également une potentielle évacuation du quartier et l'accessibilité des services de secours. Tous les logements sont également conçus avec une élévation équivalente au niveau de la crue extrême de référence (Redeker, 2012). Les parkings en sous-sol sont autorisés dans le quartier dans l'idée qu'ils puissent servir de zones de rétention en cas de besoin. Enfin, la ville fournie à chaque nouvel habitant des documents d'information concernant le risque inondation et les comportements à adopter. L'objectif est de responsabiliser les individus afin de participer à une approche collective du risque inondation.

Figure 34 : Conception du quartier Zolhlafen (Balsells, 2015)

- Le quartier HafenCity à Hambourg (Allemagne) souligne l'idée que la résilience renvoie avec le fait de faire *avec* l'élément perturbateur en l'utilisant comme un argument d'innovation. L'objectif de ce projet est de construire un quartier dynamique, attractif, mêlant logements (5 500 pour 12 000 habitants), commerces et activités tertiaires d'ici 2025. Or, ce quartier est situé au-delà de la ligne de protection des digues et est donc en zone inondable. Le choix d'aménagement a donc été de ne pas utiliser des systèmes d'endiguement classiques. Les bâtiments de HafenCity reposent donc sur des pieux enfoncés jusqu'à 20 m dans le sol afin de s'appuyer sur des strates de sable stables. En plus de cela, des terps, dispositifs techniques de 7 à 9 m de hauteur,

rehaussent les bâtiments. De même, toutes les rues situées au niveau du sol sont doublées par des passerelles situées à 7,50 m de hauteur (Figure 35) afin de garantir l'accessibilité des bâtiments et commerces même en cas d'inondation.

Figure 35 : Exemple du quartier « résilient », HafenCity, Hambourg, Allemagne (collection personnelle)

L'Elbphilharmonie illustre l'enjeu de construire avec l'élément naturel. Cet auditorium, construit par Herzog & De Meuron, joue avec l'élément aquatique à travers des parois en verre qui reproduisent le mouvement d'une vague. Cette construction monumentale incarne la volonté de créer un quartier dynamique qui évolue avec le risque (Figure 36).

Figure 36 : L'Elbphilharmonie de Hambourg © Maxim Schulz

- En France, le quartier Matra à Romorantin-Lathenay (Daniel Lacombe, n.d.; Serre et al., 2017) est un exemple d'aménagement résilient au risque inondation. Le quartier a été conçu pour évoluer avec et à travers le rythme des inondations. L'idée était de visualiser l'inondation selon un rythme progressif afin de développer une réflexion et une démarche de prévention via une culture du risque. Les bâtiments ont été conçus pour résister aux impacts d'une inondation et garantir un retour rapide au fonctionnement normal du quartier. Le quartier n'a pas été conçu pour résister à l'eau mais au contraire pour l'intégrer dans sa conception. L'eau fait partie du caractère paysager du quartier et permet de prévenir visuellement du risque (Figure 37 et Figure 38). Les habitants peuvent voir progressivement l'eau monter et se mettre à l'abris au besoin. L'inondation n'est plus un mythe abstrait mais une réalité tangible et visible, ce qui favorise le développement d'actions adaptées en cas d'inondation.

Figure 37 : Quartier Matra ©Libération 27/06/2016

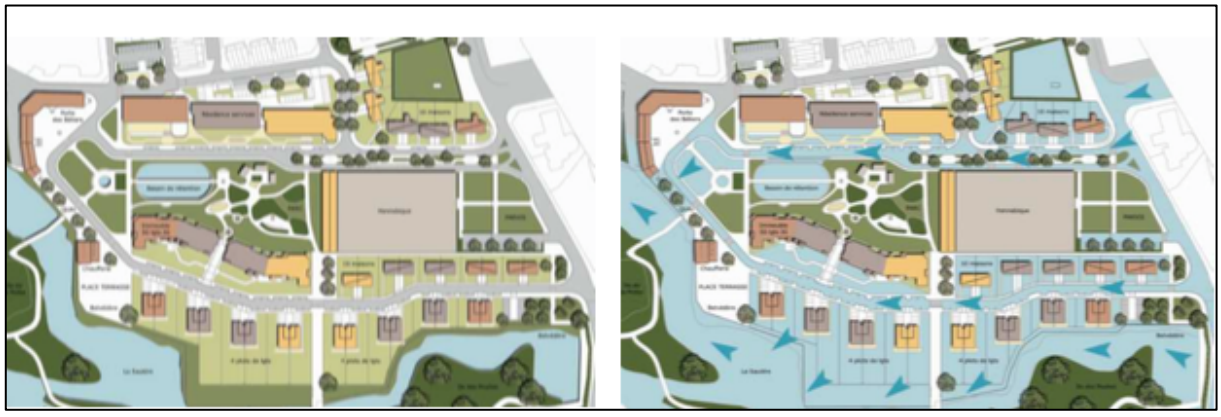

Figure 38 : Quartier Matra. Conception du quartier en temps sec et en situation d'inondation (Daniel-Lacombe, 2012)

Ces exemples illustrent l'enjeu d'aménager en zone inondable et soulignent l'obligation d'innover afin de concevoir des quartiers résilients. Si les pratiques, approches, définitions et outils de résilience varient, l'objectif final demeure de redonner de la place à l'eau. Ce positionnement s'explique pour plusieurs raisons, des raisons physiques et psychologiques.

Tout d'abord, dévier ou transformer le cours d'eau par des systèmes de protection (tels que les digues ou les barrages) fragilise son fonctionnement naturel en empiétant sur les zones d'expansion de crue. Or, selon le principe de neutralité hydraulique, il n'est pas possible de construire un projet qui viendrait à impacter négativement l'aval du cours d'eau. Certains projets ont donc cherché à concevoir avec le cours d'eau afin d'innover et construire en zone inondable. L'enjeu ici est à la fois de ne pas impacter le cours d'eau mais également, et principalement, d'assurer la sécurité des habitants, leurs déplacements et activités mais aussi leur potentielle évacuation.

Concernant l'enjeu psychologique, la résilience passe, entre autres, par une culture du risque concertée et adaptée. Or, la connaissance et la perception adéquate du risque sont des composantes essentielles de la construction d'une culture du risque. Concevoir des quartiers résilients avec l'élément naturel participe donc à alerter, informer et instruire les habitants du risque. Les comportements changent et s'adaptent au risque afin de limiter les conséquences négatives liées à la méconnaissance de l'aléa (Gisclard, 2017).

Pourtant, aucun de ces exemples d'aménagement ne définit clairement ce qui considéré comme un « quartier résilient ». Définir et mesurer les capacités de résiliences de ces territoires est donc encore limité, ce qui remet en question la capacité à développer des stratégies de gestion des risques résilientes. Opérationnaliser la résilience passe donc également par sa mesure et sa modélisation afin d'évaluer les capacités de résilience des systèmes urbains.

> ***Penser la ville résiliente conduit à plusieurs approches. Que ce soit des projets à l'échelle de la ville (FloodResilienCity) ou à l'échelle du quartier (HafenCity), l'objectif est de concevoir l'espace urbain avec le risque. Les deux entités ne sont donc plus en opposition, mais l'association du risque et de la ville permet d'innover sur l'aménagement du territoire. D'espaces inondables, ces quartiers évoluent en territoires résilients. Pourtant, ces projets ne proposent que très peu des caractéristiques précises de résilience. En outre, ces exemples restent ponctuels et n'entraînent pas toujours une opérationnalisation à plus large échelle.***

2. Évaluer la résilience

L'opérationnalisation consiste en grande partie à déterminer comment un concept peut être mesuré (Adger et al., 2004) et à déterminer quels seront les indicateurs qui serviront à mesurer le concept afin de produire des données à son sujet. L'évaluation de la résilience passe donc essentiellement par sa mesure (Dauphiné and Provitolo, 2007) et la création d'indicateurs.

2.1. Définition des indicateurs

Les indicateurs sont des variables quantitatives destinées à représenter une caractéristique d'un système ou concept. Ils ont été employés pour éclairer la prise de décision, améliorer la participation des parties prenantes, établir un consensus, explorer les processus sous-jacents etc. (Parris and Kates, 2003). L'objectif d'un indicateur est d'apporter « *une information devant aider un acteur, individuel ou plus généralement collectif, à conduire le cours d'une action vers l'atteinte d'un objectif ou devant lui permettre d'en évaluer le résultat* » (Bonnefous, 2001). L'indicateur peut être un paramètre, une valeur, une donnée ou encore une observation. Son objectif est de donner des indications ou décrire un phénomène, une situation, un environnement, un processus. Il est nécessaire de définir au préalable un objectif auquel les indicateurs vont tendre. Un indicateur peut être composé d'une seule variable (par exemple, le revenu) ou d'une combinaison de variables (par exemple, le produit intérieur brut) (Birkmann, 2006) (Figure 39).

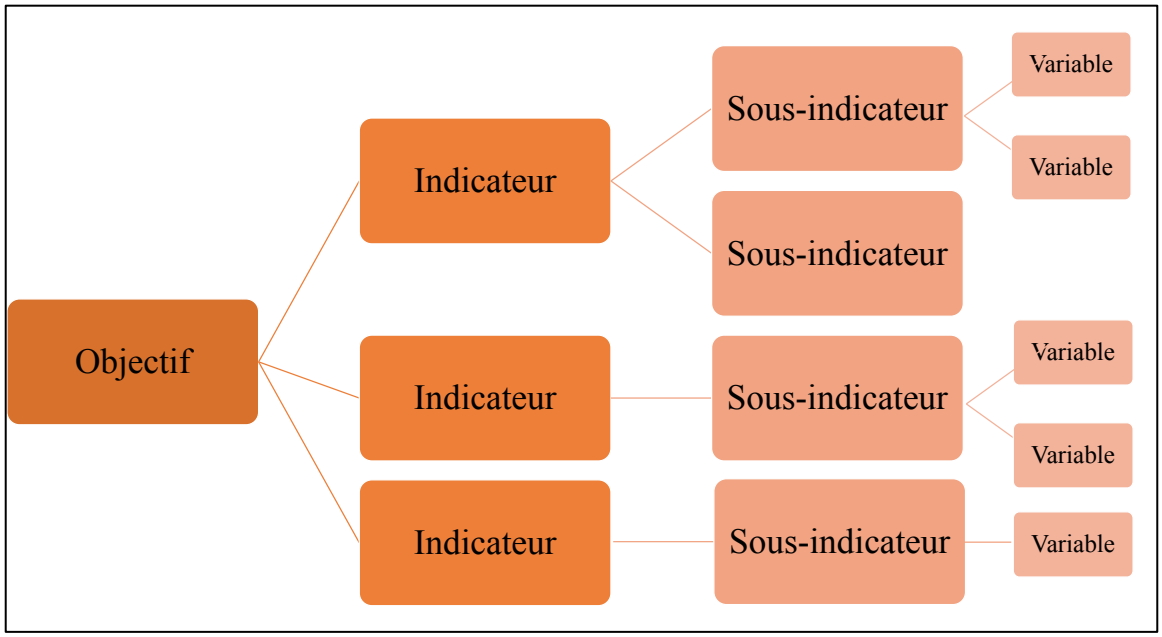

Figure 39 : Schématisation simplifiée de la construction d'indicateurs

Quel que soit le mot employé, l'indicateur définit avant tout la « *relation obligée qui lie l'information contenue par l'indicateur et l'objet pointé par l'indicateur* » (Maby, 2003). L'indicateur a donc comme fonction de montrer, de placer « *dans l'espace et c'est cette nature spatialisante* » (Maby, 2003), ce qui le rend intéressant comme outil géographique. Si

l'indicateur au sens premier du terme n'analyse ou ne définit pas, il prend tout son sens par la lecture qui en est faite par l'observateur. Du fait de son caractère éminemment opératoire, il permet d'ancrer dans la réalité pratique les observations et résultats. Il répond directement à la question posée par l'utilisateur confirmant ou non l'hypothèse initiale. Les hypothèses et les jugements formulés lors du choix des questions et des données pertinentes pour l'élaboration de l'indicateur, ainsi que l'évaluation de l'utilité de l'indicateur, exigent l'existence d'objectifs, implicites ou explicites (Figure 40). Un indicateur collecte des données et des informations afin d'agréger les connaissances, ce qui est essentiel pour être en mesure de faire les bons choix (Wisner and Walter, 2005). C'est pourquoi les indicateurs participent pleinement au processus d'aide à la décision (Tate, 2012).

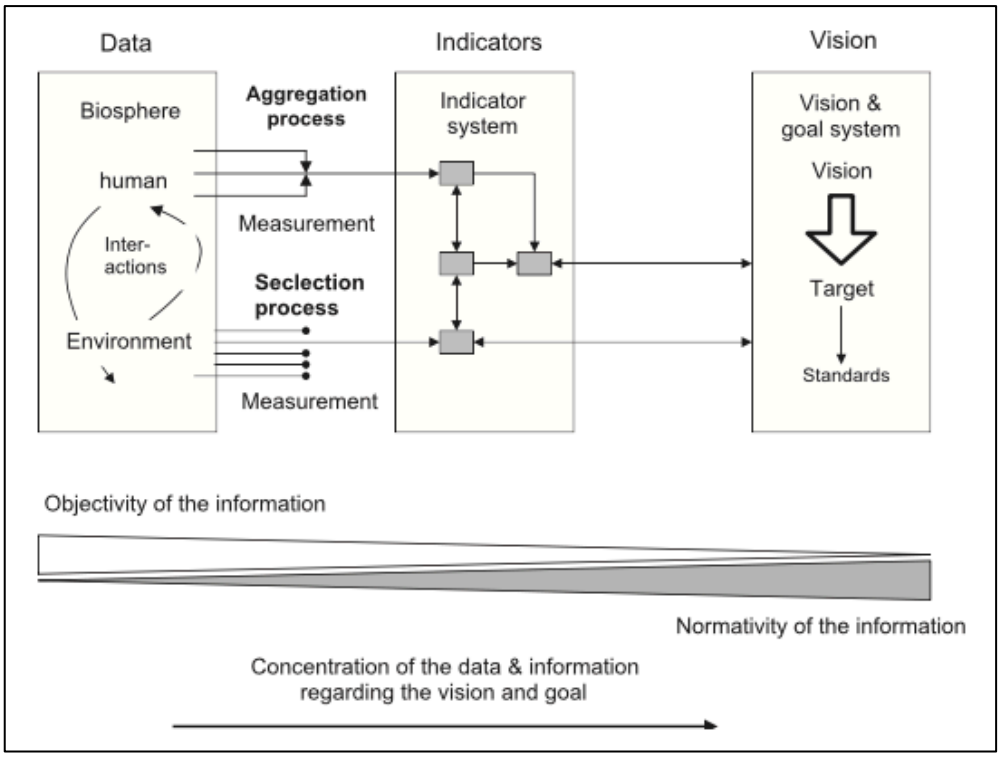

Figure 40 : Interrelations entre les indicateurs, les données et les objectifs finaux (Birkmann, 2006)

Cependant malgré son caractère opératoire, « *l'indicateur (n'est qu'une) expérience du réel, mais en aucun cas une expérimentation* » (Maby, 2003). Il faut donc garder en tête que c'est une image pratique de la réalité mais que ce n'est pas objectivement la réalité du territoire. L'indicateur ne fait que reproduire ou reconstruire une image de l'espace géographique, ce qui rend le choix de l'indicateur, des variables, des traitements très subtile et complexe. Or ce choix est lui-même construit autour *d'a priori* représentationnels, d'un paradigme sociocognitif qu'on ne peut nier. Il est donc nécessaire d'objectiver au maximum la construction de ces variables et indicateurs pour prétendre à une réalité des résultats.

Il existe plusieurs « formats » d'indicateurs. Les indicateurs multiples, par exemple, peuvent être combinés à des indicateurs composites non-structurés, ou indices, qui tentent de distiller la complexité d'un système entier en une seule mesure. Les indicateurs sociaux sont utilisés depuis les années 1960, avec des applications à l'environnement (années 1970), la

durabilité (années 1990), et plus récemment la vulnérabilité (Birkmann, 2006; King and Macgregor, 2000) et la résilience (Cutter et al., 2010). Les principaux indices mondiaux et régionaux récents qui modélisent divers aspects de la vulnérabilité comprennent l'Indice de développement humain (PNUD), l'Indice de risque de catastrophe (PNUD 2004) ou encore l'Indice de durabilité environnementale. L'indice de vulnérabilité sociale (Cutter et al. 2003) est l'indice le plus connu pour l'évaluation à l'échelle nationale, avec des applications aux États-Unis et à l'étranger (de Oliveira Mendes, 2009; Finch et al., 2010; Holand et al., 2011).

> ***Un indicateur est un outil qui permet d'identifier des caractéristiques d'un phénomène, d'apporter des informations sur un processus ou une situation afin d'informer les acteurs et entraîner une prise de décision. L'indicateur est une construction subjective d'une réalité qui permet d'opérationnaliser les observations d'un phénomène. Cet outil est donc essentiel dans le processus d'aide à la décision.***

2.2. Les indicateurs utilisés en gestion des risques

Depuis une dizaine d'années, l'utilisation des indicateurs s'est propagée dans le domaine des risques, et plus précisément dans la mesure de la vulnérabilité des territoires et des populations face aux risques (Cutter et al., 2008a). Si l'utilisation d'indicateurs s'est de plus en plus développée dans la gestion des risques c'est notamment grâce à leur capacité à mesurer ou/et opérationnaliser une variable pour décrire un phénomène extraordinaire (Øien, 2001). Les indicateurs sont appréciés en raison de leur capacité à intégrer de grandes quantités d'informations sous une forme facilement compréhensible, ce qui en fait des outils de communication et des instruments d'action précieux (Freudenberg, 2003). Ils peuvent assumer différents types de fonctions, simplifier les données sans perdre de vue le rôle qu'ils jouent en tant qu'outil de communication essentiel pour l'élaboration des politiques et la communication publique (Cutter et al., 2010). Plusieurs indicateurs existent pour évaluer les risques. Un risque n'est pas simplement la survenue d'un phénomène naturel intense mais aussi des conditions de vulnérabilité qui favorisent ou facilitent l'intensité de la catastrophe. Les catastrophes sont donc des produits socio-environnementaux. Cela signifie que la société doit s'engager dans un processus de prise de décision afin de diminuer les impacts négatifs de la catastrophe. Afin d'encourager ce processus, l'identification de risques existants, probables et futurs doivent être menée (Adger et al., 2004). Or, cela ne peut pas se faire sans un système adéquat de mesure des risques (Cardona, 2004; Cardona et al., 2012). L'évaluation et le suivi des risques est nécessaire pour identifier les éléments potentiellement affectés. Cette identification doit servir aux gestionnaires à prendre conscience de la situation, identifier les causes de la catastrophe et entraîner une prise de décision (Cardona, 2007). Certains indicateurs d'évaluation des risques abordent la proportion de pertes économiques, d'autres identifient les risques sociaux et environnementaux ou encore la performance du management des risques (Cardona, 2007) :

- L'indicateur de déficit en cas de catastrophe (*The Disaster Deficit Index*) mesure le risque national d'un point de vue macroéconomique et financier. Il nécessite l'estimation de l'impact critique au cours d'une période d'exposition donnée, telle que la capacité financière du pays à faire face à une situation de crise (Cardona and Carreño, 2011) ;
- L'indicateur des catastrophes locales (*The Local Disaster Index*) identifie les risques sociaux et environnementaux résultant d'événements récurrents (qui sont souvent chroniques aux niveaux local et infranational). Ces événements ont un impact disproportionné sur les populations socialement et économiquement plus vulnérables et ont des effets très néfastes sur le développement national ;
- L'indicateur de gestion des risques (*The Risk Management Index*) regroupe un ensemble d'indicateurs qui mesurent la performance d'un pays en matière de gestion des risques. Ces indicateurs reflètent les mesures d'organisation, de développement, de capacité et de décisions institutionnelles prises pour réduire la vulnérabilité et les pertes, pour se préparer aux crises et pour se relever efficacement des catastrophes.

Ces indicateurs permettent de disséquer la catastrophe de façon à analyser à différentes échelles temporelles les éléments impactés. Les indicateurs pour l'évaluation des risques doivent conduire à l'interrogation des concepts de vulnérabilité et de résilience afin de participer à la construction de stratégies adéquates de gestion des risques.

2.3. Des exemples de modèles d'évaluation de vulnérabilité et de résilience

2.3.1. Des indicateurs de vulnérabilité

Un indicateur de vulnérabilité peut-être défini comme « *une variable qui est une représentation opérationnelle d'une caractéristique ou d'une qualité d'un système capable de fournir des informations concernant la susceptibilité, la capacité d'adaptation et la résilience d'un système à l'impact d'un événement bien défini qui est lié à un risque d'origine naturelle* » (Birkmann, 2006). Leur utilisation permet l'identification et la visualisation des différentes caractéristiques de la vulnérabilité, ou l'évaluation des stratégies politiques et le suivi de leur application. Dans ce contexte, Benson (2004) souligne que la mesure de la vulnérabilité permet de mieux comprendre les facteurs qui contribuent à la vulnérabilité, bien que l'approche post catastrophe souvent utilisée ne puisse être réellement associée à la vulnérabilité future. Selon Benson, l'identification et la compréhension de la vulnérabilité et de ses facteurs sous-jacents sont des objectifs et des fonctions importants pour mesurer la vulnérabilité. Les indicateurs de vulnérabilité peuvent être globaux ou locaux (Füssel, 2010; Ludena and Yoon, 2015). Dans le contexte de risques, ce sont essentiellement des indicateurs de vulnérabilités sociales qui existent (King and Macgregor, 2000).

◊ Les indicateurs Leaken (Jean et al., 2019)

A l'échelle européenne, les premiers indicateurs (2001) liés à la vulnérabilité sociale ont été créés autour de la notion de pauvreté (Jean et al., 2019). Les indicateurs de Leaken ont été conçus afin d'établir 18 indicateurs de pauvreté et d'exclusion sociale (Figure 41). Ils ont été créés en 2001 lors du concil Européen à Bruxelles dans la banlieue de Leaken. Leur conception a été envisagée dès l'année précédente lors de la Stratégie de Lisbonne afin de créer une économie compétitive. L'objectif ultime de ces indicateurs est de mesurer les différentes dimensions de la pauvreté et de l'exclusion sociale en termes de pauvreté monétaire, d'accès au marché du travail, d'éducation, de logement, de santé, d'un manque d'accès aux infrastructures, etc. Les indicateurs de pauvreté ont été construits à l'aide des seuils de pauvreté de chaque pays européen. Les résultats sont accessibles à chaque État afin de les aider à faire la lumière sur ces thèmes sociaux.

The Laeken Indicators (2001)

Primary indicators (10):

Indicator 1a: At-risk-of-poverty rate by age and gender
Indicator 1b: At-risk-of-poverty rate by most frequent activity and gender
Indicator 1c: At-risk-of-poverty rate by household type
Indicator 1d: At-risk-of-poverty rate by tenure status
Indicator 1e: At-risk-of-poverty threshold (illustrative values)
Indicator 2: Inequality of income distribution S80/S20 quintile share ratio
Indicator 3: At-persistent-risk-of-poverty rate by gender (60% median)
Indicator 4: Relative at-risk-of-poverty gap
Indicator 5: Regional cohesion (dispersion of regional employment rates)
Indicator 6: Long term unemployment rate
Indicator 7: Persons living in jobless households
Indicator 8: Early school leavers not in jobless households
Indicator 9: Life expectancy at birth
Indicator 10: Self defined health status by income level

Secondary indicators (8):

Indicator 11: Dispersion around the at-risk-of-poverty threshold
Indicator 12: At-risk-of-poverty rate anchored at a moment in time
Indicator 13: At-risk-of-poverty rate before social transfers by gender
Indicator 14: Inequality of income distribution Gini coefficient
Indicator 15: At-risk-of-poverty rate by gender (50% median)
Indicator 16: Long term unemployment rate
Indicator 17: Very long term unemployment rate
Indicator 18: Persons with low educational attainment

Figure 41 : Les indicateurs Leaken (Jean et al., 2019)

Cependant les détracteurs de cette méthodologie pointent du doigt l'approche trop générale des indicateurs ce qui les rend difficilement associables à des politiques ou mesures spécifiques d'aménagement. En outre, la construction même de ces indicateurs – issus de consultations et de compromis politiques – est questionnée ce qui conduit à une utilisation très limitée des indicateurs et de leurs résultats.

Avantages	Inconvénients
- Vulnérabilité sociale - Large éventail d'indicateurs (emplois, cohésion régionale, accès à la santé, etc.) - Résultats accessibles pour chaque État européen	- Approche trop générale - Acquisition des données discutable - Reproductibilité limitée - Comparaison entre pays limitée étant donné que la construction des indicateurs à l'échelle de chaque pays est liée à des compromis politiques

Tableau 4 : Avantages et inconvénients des indicateurs Leaken

◊ Le Social Vulnerability Index - SoVI (Cutter et al., 2003)

Le travail de Susan Cutter a grandement fait évoluer la notion de mesure de concept tels que celui de la vulnérabilité sociale. La vulnérabilité sociale est une mesure à la fois de la sensibilité d'une population à des aléas naturels et de sa capacité à réagir et à se remettre de ces aléas (Cutter and Finch, 2008). Plusieurs éléments peuvent alors influencer cette vulnérabilité sociale tels que le manque d'accès aux ressources (les ressources comprenant également les informations, les connaissances, la technologie, etc.), l'accès limité au pouvoir et aux instances politiques, au capital social (comprenant les réseaux et les liens sociaux), les croyances et les coutumes, l'accessibilité et l'âge du parc immobilier, les personnes fragiles et physiquement limitées et le type et la densité des infrastructures critiques. 11 indicateurs composites ont été créés pour évaluer la vulnérabilité sociale des différents comtés américains. Ces indicateurs analysent la fortune personnelle (revenu annuel), l'âge, la densité de l'environnement bâti, la dépendance économique, le parc des logements (type d'habitat et type de contrat – location ou achat), la race ethnique, le type d'occupation et d'emploi, l'accessibilité aux infrastructures etc. Grâce aux données de *l'U.S. Census* il a été possible de cartographier le degré de vulnérabilité sociale dans tous les comtés des États-Unis (Figure 42).

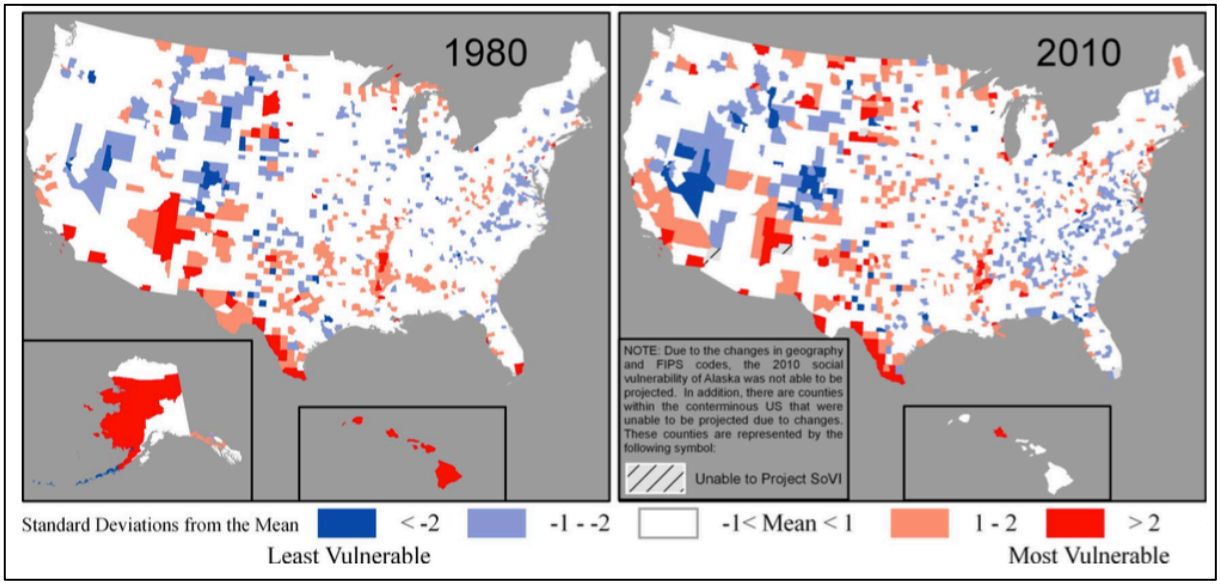

Figure 42 : Vulnérabilité sociale 1980-2010 à l'échelle des USA (Cutter and Finch, 2008)

L'indice SoVI est une mesure spatiale sans unité, et son importance réside dans sa valeur comparative d'un lieu géographique à l'autre, et non dans sa valeur absolue. Nous pouvons considérer SoVI comme un algorithme de quantification de la vulnérabilité sociale plutôt que comme un simple indice numérique qui peut être vérifié sur le terrain avec des données d'observation directes.

Avantages	Inconvénients
- Vulnérabilité sociale intégrant les facteurs de fragilités - Intègre les capacités à se remettre d'une perturbation - Large éventail d'indicateurs - Intègre les capacités individuelles mais aussi les interactions entre les individus et leur environnement - Données accessibles sur le data.census.gov - Évolution dans le temps de la cartographie (1980-2010)	- Cartographie à l'échelle des comtés des USA - Vulnérabilité à l'échelle des risques naturels mais pas de risque précis identifié (inondation, tremblement de terre, ouragan ?) - Pas de métrique des quotients de vulnérabilité

Tableau 5 : Avantages et inconvénients de l'outil SoVI

◊ Le Social Vulnerability Index (SVI) (Flanagan et al., 2011)

L'indice de vulnérabilité sociale (SVI) de Flanagan et al. (2011) quantifie la vulnérabilité sociale face aux catastrophes. La motivation du SVI est d'aider à la gestion des catastrophes d'un point de vue social, avec l'objectif déclaré d' « *améliorer toutes les phases du cycle des*

catastrophes : atténuation, préparation, réaction et rebond» (Flanagan et al., 2011) Cet outil reprend ici les idées clés de la résilience et utilise des paramètres similaires aux indices de résilience (Fekete, 2009). Le SVI identifie 15 variables selon quatre catégories de vulnérabilité sociale : statut socioéconomique, composition du ménage et handicap, statut minoritaire et langue, logement et transport. L'échelle de collecte des données est différente de celle du SoVI : elles ont été recueillies à partir du recensement de 2000, plutôt qu'au niveau des données du comté. Les rangs centiles ont été calculés pour montrer la valeur relative d'un lieu aux États-Unis (Figure 43). Enfin, les rangs centiles ont été additionnés pour les 15 variables de chaque piste de recensement, ce qui a donné un score entre 0 (le moins vulnérable) et 15 (le plus vulnérable).

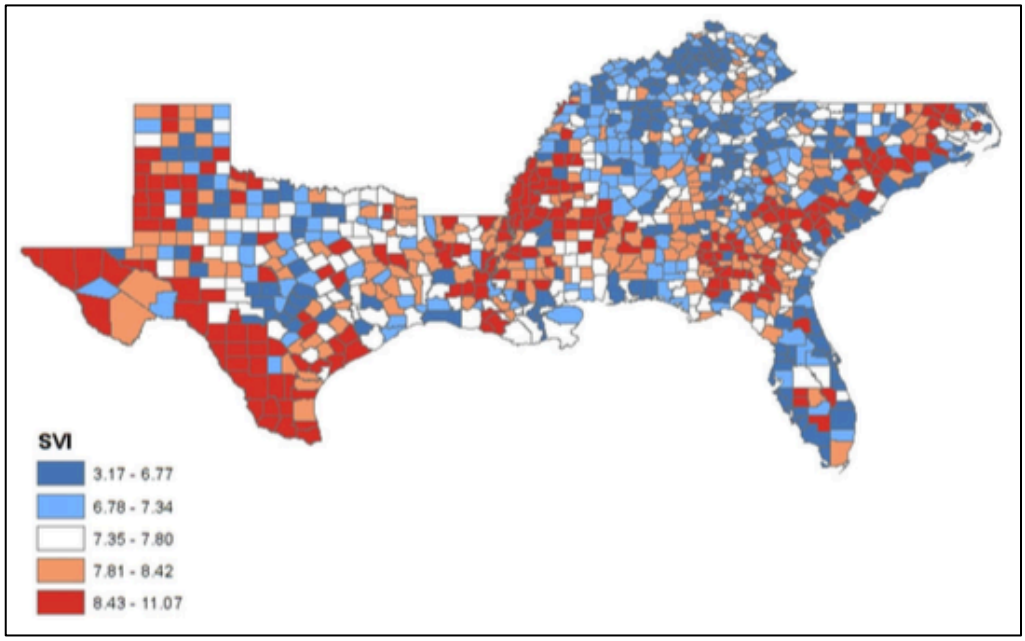

Figure 43 : Cartographie de la vulnérabilité aux USA à l'aide du SVI (Bakkensen et al., 2017)

Avantages	Inconvénients
- Intègre 4 critères de vulnérabilité : statut socioéconomique, composition du ménage et handicap, statut minoritaire et langue, logement et transport - Intègre la définition de résilience - Indicateurs construits à l'aide des données du recensement - Score de vulnérabilité de 0 à 15	- Cartographie de la vulnérabilité à l'échelle nationale - Vulnérabilité à l'échelle des risques naturels mais pas de risque précis identifié (inondation, tremblement de terre, ouragan ?) - Pas d'évolution dans le temps

Tableau 6 : Avantages et inconvénients de l'outil SVI

◊ Le Physical Vulnerability Index (PhyVI) (Rød et al., 2012)

L'indicateur de vulnérabilité physique conçu et testé par (Rød et al., 2012) en Norvège, s'est construit après avoir identifié 4 étapes et objectifs :

- Créer des indices de vulnérabilité pour chaque type de danger ;
- Combinaison de l'inondation, des glissements d'argile et des glissements de terrain dans un indicateur de vulnérabilité physique (PhyVI) ;
- Évaluer la vulnérabilité sociale et créer un indicateur de vulnérabilité sociale (SoVI) ;
- Intégrer la vulnérabilité physique et la vulnérabilité sociale pour créer un indicateur de vulnérabilité globale ;

Le PhyVI (Figure 44) est composé de trois sous-indices : le FloVI qui comptabilise le nombre d'adresses situées dans des zones inondables, le QVI qui dénombre les adresses localisées dans les différentes zones de glissements d'argile et le SliVI qui est basé sur les glissements de terrain historiques géoréférencés et ayant eu des conséquences en termes de dommages aux personnes et aux bâtiments, aux infrastructures ou aux terres agricoles.

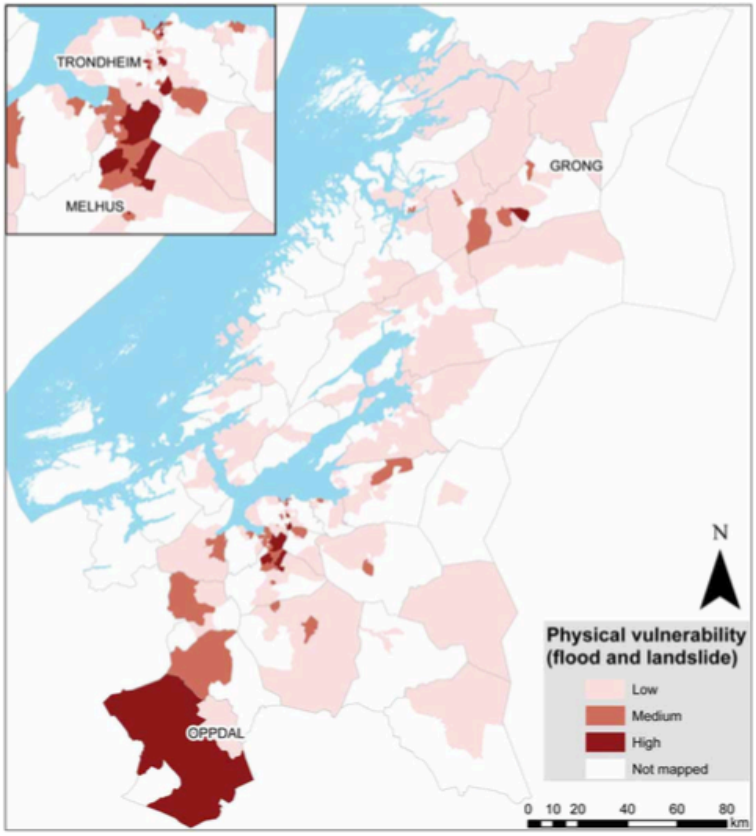

Figure 44 : Cartographie du PhyVI à Trondheim (Rød et al., 2012)

Le SoVI a ensuite été adapté à la situation de Trondheim (Figure 45).

Indicator	Mean	St. Dev.	Min.	Max.	Description
Wealth	41,114	69,562	−496,885	403,596	Median net wealth for persons aged 17 year and older, 2008
In-migration (%)	107.8	78.9	8.4	601.8	In-migration to the district 1999–2008. Per cent of total population in 2009
Immigration (%)	2.6	4.3	0.0	54.9	Immigration and born Norwegians with immigrants parents in per cent, 2009
Densely populated (%)	48.3	47.2	0.0	100.0	Share of population living in densely populated areas, 2009
Pop. 16–67 (%)	66.8	6.9	28.6	94.2	Share of population in age group 16–67 years. Per cent of total population in 2009
Primary industries (%)	4.3	5.6	0.0	38.7	Share of population in age group 21–67 years working in primary industries, 2009
Income	286,878	43,954	15,198	429,987	Median gross income for persons aged 17 years and older, 2008
Secure job (%)	9.8	6.6	0.0	38.0	Share of population in age group 21–67 years working in national or county administration, or in the social security administration, 2009
Having work (%)	78.7	9.3	12.5	103.7	Share of population in age group 21–67 years having work, 2009
Single parents (%)	5.0	3.1	0.0	16.7	Per cent of single mother/father with children aged under 18 years, 2009
Death rate[a]	27.3	32.1	0.0	235.0	Death rate per 1000 of mean population for the period 1999–2008

Figure 45 : Variable du SoVI utilisées à Trondheim (Rød et al., 2012)

Ces deux indicateurs ont été agrégés à poids égal afin de cartographier la vulnérabilité globale de la ville de Trondheim (Figure 46) et créer l'IntVi, l'Integrated Index.

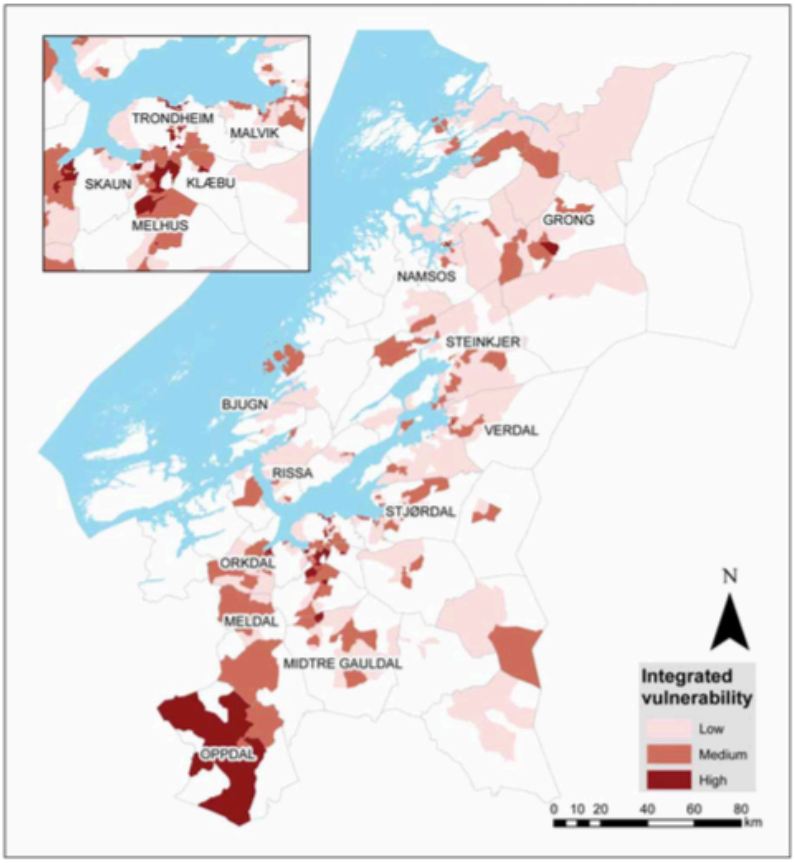

Figure 46 : L'IntVI à Trondheim (Rød et al., 2012)

Avantages	Inconvénients
- Intègre la vulnérabilité physique et sociale - Conception d'un indicateur intégré de vulnérabilité - Échelle urbaine	- Questionnement quant à la répartition des poids des sous-indicateurs - 3 indicateurs de vulnérabilité physique mais pas de projection dans un contexte de changement climatique - Pas d'évolution dans le temps

Tableau 7 : Avantages et inconvénients de l'IntVI

◊ Quantifying Social Vulnerability (Dwyer et al., 2004)

Dans cette étude, une méthodologie est mise au point pour évaluer la vulnérabilité des individus au sein des ménages aux risques liés aux aléas naturels en Australie. La méthodologie introduit une technique pour mesurer certains attributs des individus vivant au sein d'un ménage qui contribuent à leur vulnérabilité face à aléa naturel. Étant donné que l'étude se concentre spécifiquement sur la mesure de la vulnérabilité, les indicateurs s'y rapportant ont été limités à des indicateurs quantifiables. Treize indicateurs de vulnérabilité et deux indicateurs de risques ont été sélectionnés pour l'étude.

Les indicateurs de vulnérabilités analysent : l'âge, le revenu, le sexe, l'emploi, le type de résidence, le type de ménage, le type d'occupation, l'assurance maladie, l'assurance habitation, la propriété d'une voiture, l'invalidité, les compétences linguistiques et le possible endettement.

Les deux indicateurs de risque illustrent les dommages physiques et résidentiels.

Ces indicateurs ont permis de cartographier la potentielle vulnérabilité à l'échelle de la ville de Perth (Figure 47) selon plusieurs scénarios tels des dommages légers sur le bâti et sur les habitants, des dommages moyens sur l'un ou sur l'autre, des dommages lourds sur l'un ou sur l'autre, etc.

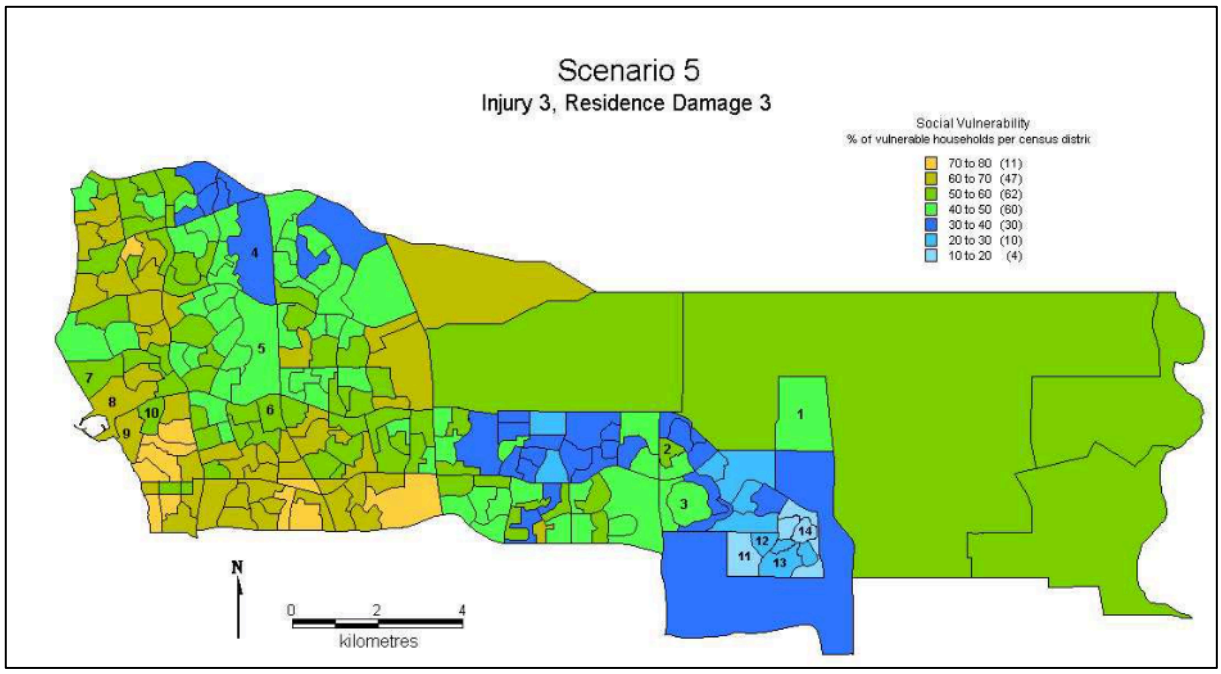

Figure 47 : Cartographie de la vulnérabilité à Perth. Ce scénario permet de visualiser la vulnérabilité des districts les zones lorsque les dommages corporels et les dommages résidentiels sont modérés (Dwyer et al., 2004)

Avantages	Inconvénients
- Intègre la vulnérabilité physique et sociale - Échelle urbaine	- 2 indicateurs de vulnérabilité physique mais pas de projection dans un contexte de changement climatique - Pas d'évolution dans le temps

Tableau 8 : Avantages et inconvénients de l'approche développée à Perth

Les indicateurs de vulnérabilité sont nombreux et diversifiés. Si chacun développe sa propre méthodologie, nous retiendrons certains atouts et certaines limites qui pourraient être intéressants dans l'optique d'opérationnaliser la résilience urbaine.

Les atouts de ces différents outils de mesure de la vulnérabilité sont :

- ***L'accessibilité facile des données et des variables liées à la vulnérabilité mais aussi aux capacités de résilience des individus ;***
- ***L'étude à l'échelle urbaine***
- ***La création d'une cartographie accessible ;***
- ***L'interrelation de la vulnérabilité sociale et physique ;***
- ***L'identification de risques précis.***

Les inconvénients de ces approches sont :

- ***L'échelle nationale d'analyse qui est difficilement compréhensible ;***
- ***L'approche générale des risques globaux qui ne permet pas une identification précise des risques d'un territoire.***

2.3.2. Des indicateurs de résilience

Mesurer la résilience est devenue une priorité internationale afin de construire des stratégies de gestion des risques (Winderl, 2014). La question de savoir comment il faut mesurer la résilience est aussi ancienne et aussi importante que le concept lui-même (Prior and Hagmann, 2014). De nombreux indices et indicateurs de résilience ont été élaborés dans diverses disciplines. En général, elles sont utilisées à des fins différentes et, en conséquence, elles mesurent différentes choses. Une exploration des tentatives de mesure de la résilience révèle la difficulté d'établir une mesure qui est à la fois précise et « *adaptée à l'objectif* » (Hinkel, 2011). La mesure exige qu'un phénomène soit observable et permette une attribution systématique de la valeur, mais la nature conceptuelle de la résilience rend cela difficile. Les scientifiques ne se sont pas encore mis d'accord sur des conventions précises pour mesurer la résilience et, par conséquent, il existe une littérature importante qui discute à la fois comment et si le phénomène peut et doit être mesuré (Hinkel, 2011).

L'identification de la capacité de résilience exige des planificateurs qu'ils déterminent des variables qui déclenchent des perturbations dans une ville (une communauté, une région ou un paysage), la fréquence et l'intensité de ces événements, ainsi que les mécanismes qui améliorent l'adaptabilité qui peuvent être activés pour répondre (ou pour éviter) ces troubles. Il est nécessaire d'évaluer les dimensions socio-économiques d'un territoire urbain (Ahern, 2011). Comme établis précédemment, il est nécessaire d'établir des dénominateurs communs qui induisent la vulnérabilité ou renforcent la résilience (Gonçalves, 2013). Or, la difficulté essentielle consiste à mesurer ces dimensions. Les défis importants que pose la mesure de la résilience entraînent soit des mesures quantifiées imparfaites, soit une recherche d'indicateurs de résilience universelle (Hallegatte and Engle, 2019). Cutter et al., (2008b) soulignent cette difficulté en estimant que « *si nous comprenons conceptuellement ou parfois intuitivement la vulnérabilité et la résilience, le diable est toujours dans les détails, et dans ce cas, le diable est la mesure* » (Cutter et al., 2008b).

◊ Le Baseline Resilience Indicators for Communities (BRIC) (Cutter et al., 2014)

A la suite de son travail sur la vulnérabilité à l'échelle des États-Unis et la création du SoVi (Cutter et al., 2003; Cutter and Finch, 2008), Cutter s'est tournée vers le concept de résilience afin de construire tout d'abord un modèle mettant en relation la vulnérabilité et la résilience (*the Disaster Resilience of Place*, DROP, (Cutter et al., 2008b)), puis une base de données d'indicateurs de résilience, le BRIC (*Baseline Resilience Indicators for communities*) (Cutter et al., 2014). Selon elle, la différence entre la vulnérabilité et la résilience est très simple, la première faisant référence au potentiel de dommages d'un espace et/ou d'une population, lorsque la seconde est définie comme la capacité d'un système à répondre et à se relever d'une catastrophe, capacité liée à des caractéristiques inhérentes du système.

Le DROP est un modèle de conceptualisation de la résilience au regard des risques naturels. Le modèle intègre dès le début des « antécédents ». Ces conditions antécédentes incluent à la fois les vulnérabilités inhérentes et les résiliences inhérentes (Figure 48). Les triangles imbriqués de la figure illustrent la façon dont ce processus inhérent se produit à l'échelle locale, entraînant des facteurs endogènes au niveau de la communauté, ainsi qu'à des échelles plus

larges (triangles plus larges) qui incorporent des facteurs exogènes. Les facteurs exogènes influencent les facteurs endogènes, malgré le fait que leur impact ne soit pas directement mesurable. Contrairement à certaines conceptualisations où la résilience et la vulnérabilité sont opposées, le modèle propose un enchevêtrement au sein de ces concepts afin qu'ils ne soient pas totalement mutuellement exclusifs, ni totalement mutuellement inclusifs. En effet, certaines caractéristiques influencent seulement la vulnérabilité ou seulement la résilience d'une communauté. En outre, il existe des caractéristiques sociales qui influencent à la fois la vulnérabilité et la résilience (statut socio-économique, éducation et assurance, par exemple).

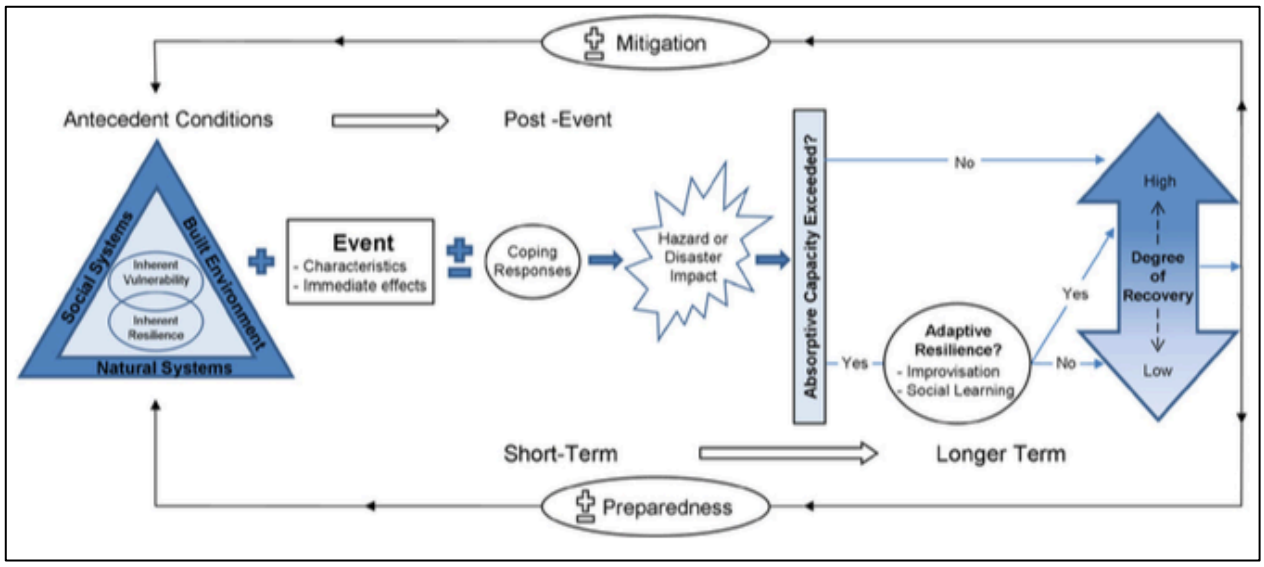

Figure 48 : Modèle conceptuel du DROP source (Cutter et al., 2008a)

Les conditions initiales (ou antécédents) interagissent par la suite avec l'événement (ou choc), produisant ainsi des effets immédiats. Ces effets sont amplifiés ou diminués par la présence d'une politique de gestion des risques (mitigation). Le résultat, c'est-à-dire l'impact de la catastrophe est alors la résultante des conditions initiales, des caractéristiques de l'événement (fréquence, durée, intensité, etc.) et des réponses des autorités. Ce travail n'est que le début du modèle conceptuel, modèle qui est développé plus largement à travers le BRIC à l'aide d'indicateurs de résilience afin de mesurer la résilience et la vulnérabilité de certaines zones.

Le BRIC (*Baseline Resilience Indicators for Communities*), tend à répondre aux limites du premier travail de recherche. Divisant la résilience en six indicateurs – social, économique, communautaire, institutionnel, infrastructurel et environnemental – Cutter se propose de mesurer la résilience (Cutter et al., 2014). Chaque indicateur est divisé en sous variables telles que l'éducation, l'âge, la maîtrise de la langue, le taux d'emplois, le taux d'immigration, l'accès à la nourriture, l'entraînement aux catastrophes, la stabilité sociale, l'accès à la santé, l'accès aux énergies, etc. Chaque variable a un effet positif ou négatif sur la résilience communautaire. L'acquisition des données a été un enjeu important. Plus de 20 ensembles de données ont été obtenus du gouvernement fédéral des États-Unis via des portails de données en ligne. Quatre ensembles de données ont été obtenus à partir de sites Web d'ONG, deux par le biais d'un

contact avec la Croix-Rouge américaine, et un à partir d'un portail de données en libre accès d'un important point de presse. Une source de donnée a été alimentée par la base de données *Dun and Bradstreet's Million Dollar Database* et nécessitait un abonnement payant pour acquérir ces données (Cutter et al., 2014). Une fois l'acquisition des données effectuée, un travail de traitement, de « nettoyage » des données a été nécessaire. La méthode choisie de traitement s'est portée sur le Min-Max. La normalisation Min-Max attribue une valeur de 0 à la valeur minimale et de 1 à la valeur maximale. Toutes les autres valeurs sont mises à l'échelle entre zéro et un en soustrayant la valeur minimale et en divisant par la plage (le minimum soustrait du maximum). Si cette méthode facilite grandement le travail de comparaison entre un large nombre de variables, l'inconvénient reste que le score final n'est pas une mesure absolue de la résilience de la communauté pour un seul endroit, mais plutôt une valeur relative dans laquelle plusieurs endroits peuvent être comparés. C'est pourquoi le travail proposé s'effectue à l'échelle des USA (Figure 49) et non à une échelle plus fine ou encore pour une seule année, n'étant pas un travail comparatif sur plusieurs années.

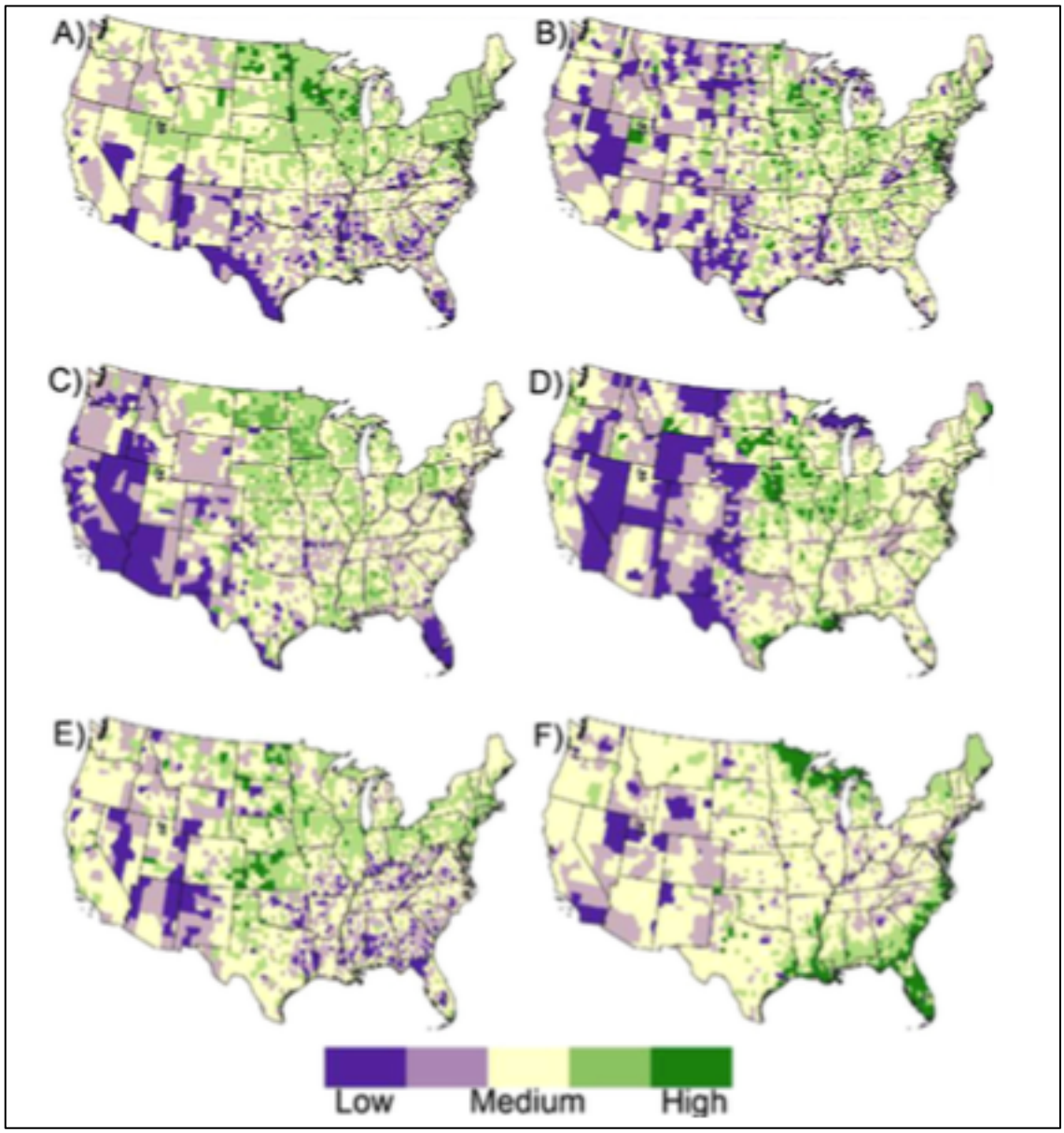

Figure 49 : Quotient de résilience à l'échelle des États-Unis pour chaque catégorie. A=social, B= économique, C= communautaire, D= institutionnel, E= infrastructures, F= Environnemental (Cutter et al., 2014)

Avantages	Inconvénients
- Analyse de la résilience sous 6 critères : social, économique, communautaire, institutionnel, infrastructurel et environnemental - Approche exhaustive des composantes du territoire urbain - Évolution dans les deux modèles - Cartographie claire des valeurs de résilience - Facilité de comparaison des valeurs de résilience - Accessibilité des données - Échange avec des acteurs	- Échelle d'analyse nationale - Score final discutable > pas de mesure absolue de résilience - Données nationales pas toujours adéquates à une analyse fine et contextualisée de la résilience - Pas de risque spécifique identifié

Tableau 9 : Avantages et inconvénients du BRIC

◊ Le DS3 Model (Spatial Decision Support System) (Serre, 2018)

Le DS3 Model a permis de définir trois capacités pour évaluer la résilience des réseaux urbains face à un risque inondation. La résilience est définie ici comme la capacité d'un système à absorber une perturbation et à récupérer ses fonctions par la suite. Trois capacités sont supposées déterminer du degré de résilience de ces réseaux (Figure 50) :

- La capacité de résistance : elle consiste à déterminer les dommages matériels suite à un risque. Il est considéré que plus un réseau est endommagé, plus il y aura une probabilité de dysfonctionnement et plus la remise en service sera lente et complexe ;

- La capacité d'absorption : elle illustre les fragilités et forces du réseau permettant de construire des alternatives à celui-ci à la suite d'une défaillance de composants ;

- La capacité de récupération : elle représente le temps nécessaire à la remise en service du réseau et de ses composants.

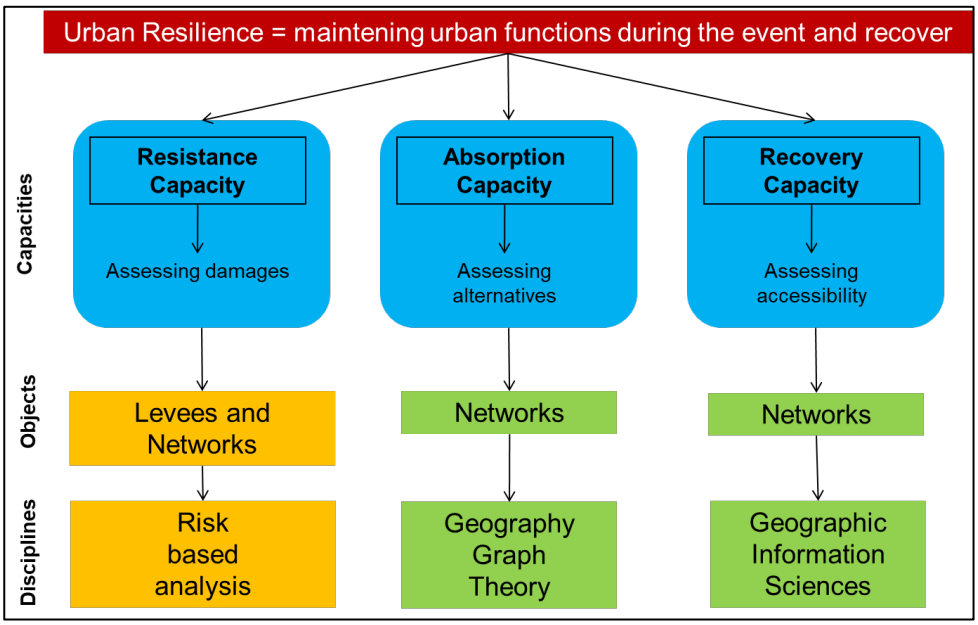

Figure 50 : Le DS3 Model (Serre, 2016b)

Ces capacités permettent de définir et mesurer la résilience des réseaux techniques urbains d'une ville. La méthodologie a été testée pour évaluer la capacité de résilience du quartier de Hambourg, Am Sandtorkai/Dalmannkai. Chaque capacité de résilience a été analysé en fonction des composantes du quartier, à son échelle puis en fonction des interactions avec son environnement (Figure 51).

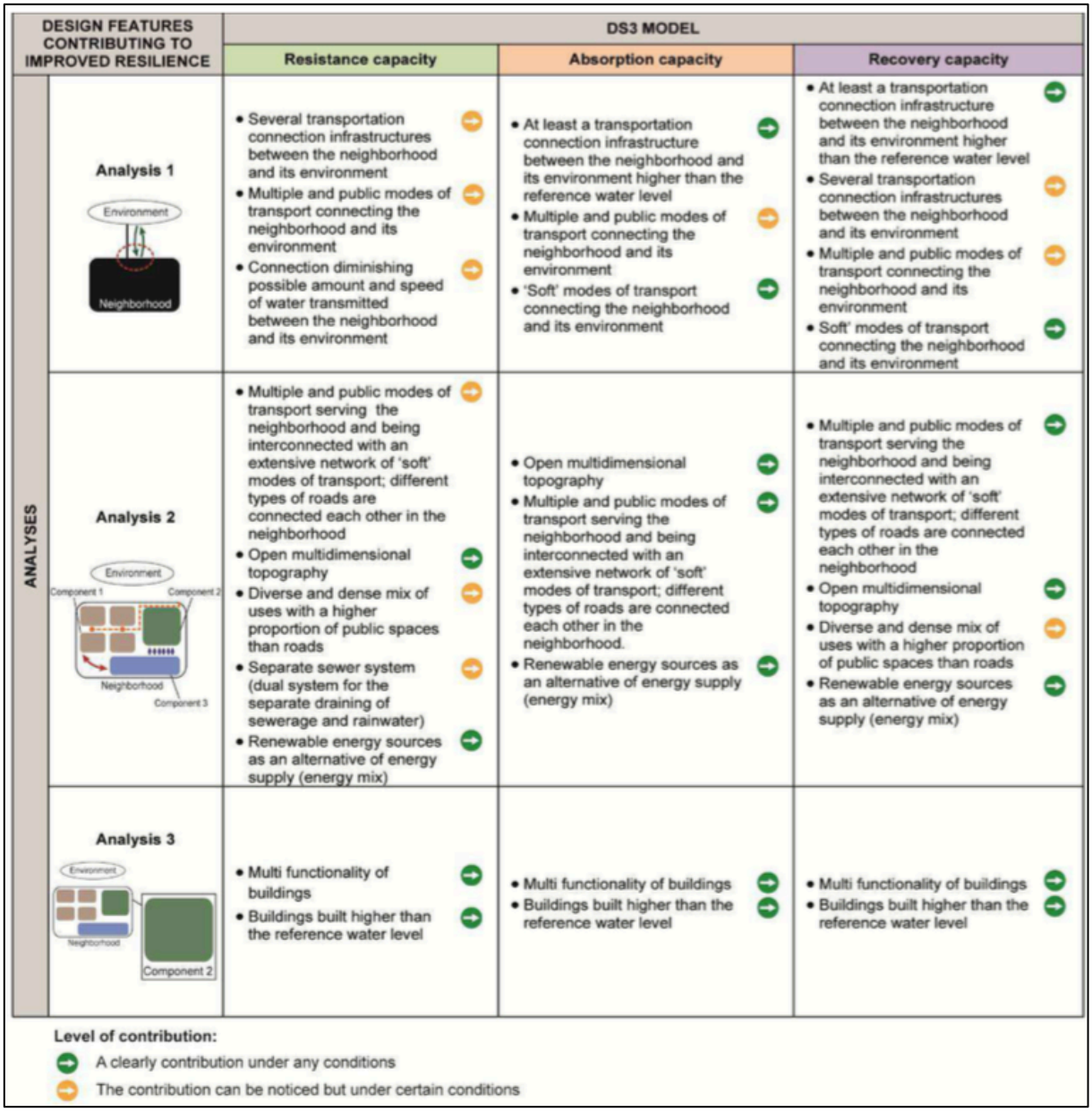

Figure 51 : Synthèse des résultats obtenus suite à l'analyse de la résilience du quartier Am Sandtorkai/Dalmannkai (Serre, 2016b)

Grâce à l'utilisation de cet outil de mesure de la résilience technique, l'analyse du cas d'étude a permis d'identifier les interdépendances et les potentiels effets dominos à l'échelle du quartier. La définition de ces trois capacités a permis d'analyser la résilience selon un temps long, avant, pendant et après une perturbation

Avantages	Inconvénients
- Analyse de la résilience selon un temps long (capacités à développer avant/pendant/après une inondation) - Analyse à l'échelle du quartier - Entraîne une aide à la décision du fait de son échelle d'analyse - Identification des relations d'interdépendance - Identification des potentiels effets dominos en cas de perturbation - Zoom sur le risque inondation	- Approche technico-fonctionnelle de la résilience centrée autour de l'analyse de la résilience des réseaux techniques urbains - Nécessite une collaboration avec acteurs locaux pour avoir des données - Pas de visualisation cartographique des capacités de résilience

Tableau 10 : Avantages et inconvénients du DS3 Model

◊ Resilience Capacity Index (Foster, 2012)

L'index de capacité de résilience développé par Foster aux USA a une a une portée plus large que les catastrophes naturelles, englobant les stress supplémentaires tels que les chocs économiques, la fermeture d'usines importantes, la croissance démographique à long terme ou les ralentissements économiques. L'index a été créé pour mesurer la " capacité de résilience ", ou le niveau de résilience avant une catastrophe, comme indicateur de la performance potentielle d'un endroit sous pression. L'index quantifie la résilience à l'échelle métropolitaine (361 aires métropolitaines analysées) et non pas à l'échelle du comté comme c'était le cas dans les travaux de Cutter. 3 indicateurs ont été créés pour illustrer des capacités : l'économie régionale, la capacité sociodémographique et le lien communautaire. Les scores varient de -1,66 (moins de résilience) à 1,23 (plus de résilience), selon les données de 2009 à 2010 (Figure 52). Les scores étant normalisés par rapport à toutes les régions métropolitaines du pays, la majorité des villes du sud-est se situent dans la moitié inférieure de la distribution, avec des niveaux moyens (certaines parties de la Floride et de Caroline) à faibles et très faibles (plusieurs régions urbaines du Texas, de la Louisiane et de la Géorgie) de la capacité de résistance. Si aucune validation empirique n'est abordée, la " performance de résilience " est néanmoins discutée en utilisant des comparaisons avec les données sur le PIB et la reprise de l'emploi après un choc.

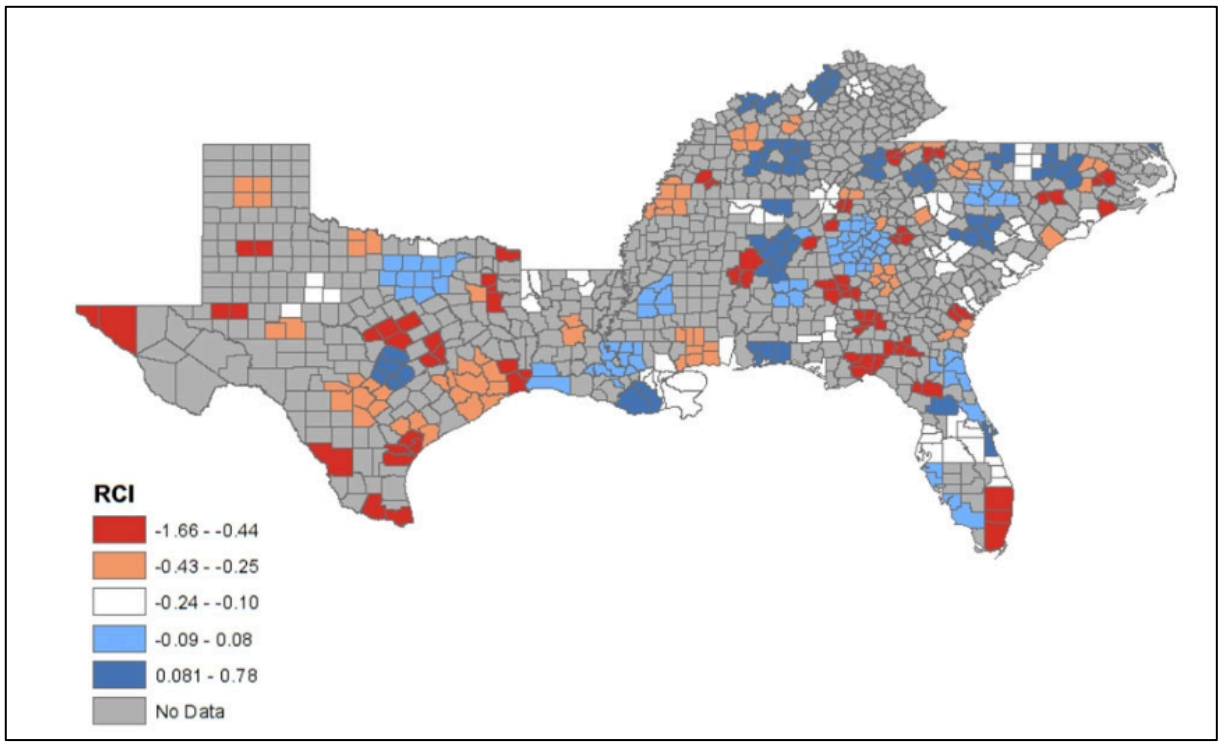

Figure 52 : Index de capacité de résilience (Bakkensen et al., 2017)

Avantages	Inconvénients
- Analyse de façon large la catastrophe (plus de catastrophe naturelle) - Intégration de la notion de stress - Notion de vulnérabilité et de résilience antérieures à la perturbation - Visualisation des scores de résilience - Échelle d'analyse métropolitaine - Tentative de validation ou du moins de discussion des résultats	- Visualisation des résultats à une échelle trop large qui complexifie la prise de décision pour les acteurs urbains

Tableau 11 : Avantages et inconvénients du Resilience Capacity Index

◊ The PEOPLES Resilience Framework (Renschler et al., 2010)

Le modèle PEOPLES se situe au carrefour du modèle conceptuel et de la construction d'indicateurs de mesure. Ce modèle distingue 7 critères de résilience d'une communauté associant chaque critère à des indicateurs de mesures :

- *Population and Demographics* : traite de la capacité des populations à résister à des aléas auxquels elles peuvent être régulièrement soumises ;

- *Environmental/Ecosystem* : aborde la capacité des écosystèmes à résister face à des aléas les mettant en péril ;
- *Organized governmental services* : met en avant la capacité des services tels que les secours publics, à réagir de façon adéquate suite à une crise ;
- *Physical infrastructure* : intègre la question des infrastructures critiques ;
- *Lifestyle and community competence* : caractérise la solidarité, le sentiment de communauté, l'entraide dans les situations de crises ;
- *Economic Development* : inclut le développement économique d'une communauté ;
- *Social-Cultural Capital* : étudie le capital socio-culturel d'une communauté.

Ces 7 critères (Figure 53) sont une base à la construction d'indicateurs à la fois qualitatifs et quantitatifs afin de mesurer spatialement et temporellement la résilience des systèmes communautaires. L'idée est d'analyser les interactions entre les différentes échelles spatiales (de l'échelle individuelle à l'échelle continentale) et leurs caractéristiques de résilience. L'utilité finale de cette approche est de fournir un outil d'aide à la décision afin d'influer sur l'aménagement urbain et d'augmenter la résilience des systèmes.

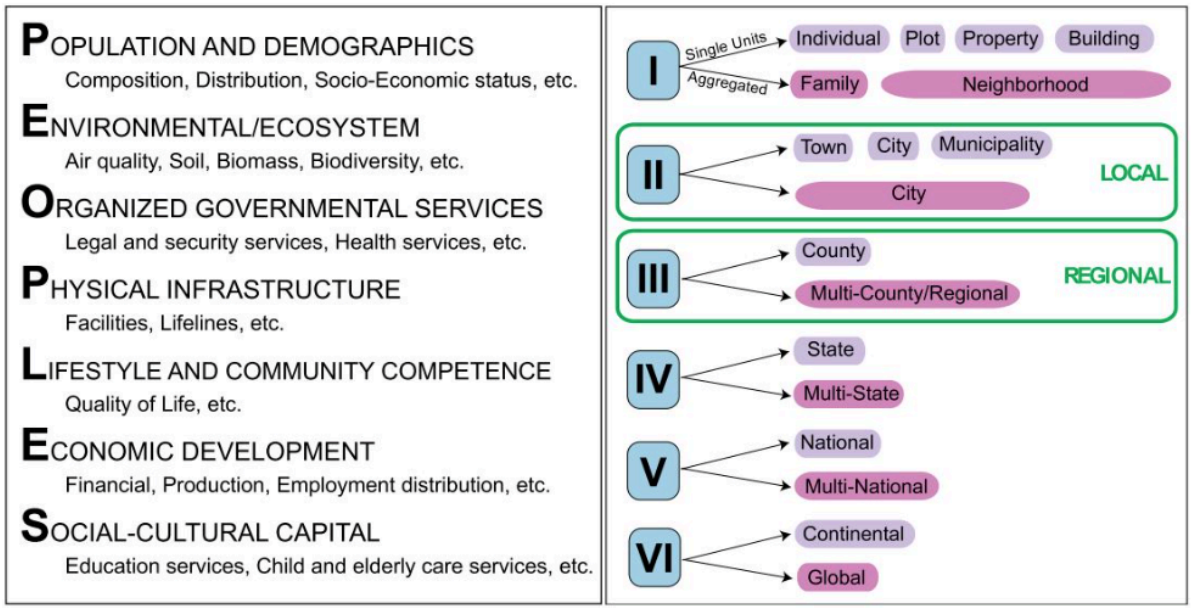

Figure 53 : Les critères de résilience du PEOPLES Resilience Framework et les échelles spatiales qui y sont liées (Renschler et al., 2010)

L'objectif de ce travail est donc d'identifier et définir des caractéristiques, critères et dimensions de résilience et de leur associer des indicateurs afin de mesurer la résilience sur un espace donné (Gonzva, 2017).

Avantages	Inconvénients
- Analyse de la résilience globale selon 7 dimensions - Prise en compte des interdépendances entre les 7 dimensions - Croisement d'échelles entre l'échelle individuelle et l'échelle spatiale - Indicateurs qualitatifs et quantitatifs - Considération de la résilience comme une variable fluctuante	- Pas d'identification de risque ou de perturbation précise - Pas de visualisation des résultats - Pas de mesure réelle de la résilience mais plus une liste de critères à développer pour développer une communauté résiliente

Tableau 11 : Avantages et inconvénients du PEOPLES Resilience Framework

L'enjeu de l'opérationnalisation de la résilience est tel que de nombreuses méthodologies se sont données le défi de répondre à cette limite.
Plusieurs avancées existent dans le domaine, avancées qui sont encore marquées par des limites méthodologiques ou d'applications.
Nous retiendrons les approches visant à définir des indicateurs de résilience exhaustifs, mêlant indicateurs de résilience technique, urbaine et sociale. L'échelle qui nous intéresse et qui favorise l'analyse et la prise de décision est l'échelle locale. Enfin, ce qui nous paraît essentiel dans un processus de d'opérationnalisation de la résilience, c'est la composante visuelle. Les résultats doivent être facilement accessibles et analysables.

3. Modéliser la résilience

3.1. De l'utilité des systèmes spatiaux d'aide à la décision

Le concept de résilience étant un sujet complexe à traiter et à opérationnaliser pour les acteurs locaux, de nombreux outils ont été créés pour simplifier, définir, mesurer et tenter d'opérationnaliser ce concept. La nécessité de créer des systèmes d'aide à la décision prend tout son sens vis à vis de l'abstraction du concept. La prise de décision consiste à distinguer plusieurs alternatives potentielles dans un ensemble défini, selon trois types de problèmes (Roy, 1985): i) choisir la meilleure alternative, ii) trier les alternatives, iii) classer les alternatives selon un ordre de préférence (Carladous et al., 2019). Dans la gestion des risques, la prise de décision est une combinaison complexe entre gestion des connaissances et processus de raisonnement (Tacnet et al., 2014). Les systèmes d'aide à la décision se définissent comme des systèmes informatiques intégrés, conçus « *spécialement pour la prise de décision* » (Coté et al., 2001). Lorsque des questions territoriales sont abordées, on parle alors de systèmes spatiaux d'aide à la décision (SSAD). Ils combinent des données spatiales et non spatiales, les fonctions d'analyse et de visualisation des systèmes d'information géographique (SIG) et des modèles de décisions afin de construire, évaluer et produire des solutions (Keenan and Jankowski, 2019). Ces systèmes spatiaux d'aide à la décision ont été développés pour répondre aux limites des SIG telles que l'absence des capacités de modélisation et le manque de souplesse des SIG pour s'adapter aux variations du contexte ou du processus de prise de décision spatiale (Densham, 1991).

L'aide à la décision spatiale est donc une aide informatisée afin d'aider à l'élaboration à l'évaluation et à la sélection de scénarios, de stratégies, d'interventions adéquates face à un problème spatial. L'objectif peut être à la fois de se confronter à une prise de décision sur le long terme (stratégies d'aménagement, stratégies de gestion des risques, etc.) ou à court terme (des situations d'urgence par exemple).

3.2. L'intégration des techniques de géovisualisation dans l'analyse des risques et de la résilience

Malheureusement, les outils actuels tels que les SIG sont souvent inadéquats face à la complexité des enjeux réels auxquels sont confrontés les utilisateurs (Andrienko et al., 2007). Pour les individus, le contexte visuel favorise l'acquisition de connaissances (Kwan and Lee, 2003). Il existe de nombreuses formes de visualisation de données qui relèvent principalement de la visualisation scientifique et de l'information (Marzouki et al., 2017) Si les données ont une combinaison de dimensions spatiales, sémantiques et temporelles, on les appelle données/information géographiques et données géo-spatiales (Marzouki et al., 2017). La visualisation de ces données devient alors spécifique, et dépasse la simple visualisation scientifique et d'information (Kurwakumire et al., 2019). L'intégration de la visualisation dans l'analyse de données géo-spatialisées a conduit à une transformation de la cartographie traditionnelle grâce à l'ère numérique (Çöltekin et al., 2017). Cette évolution de la cartographie traditionnelle a conduit à la géovisualisation, un « *ensemble des méthodes et outils de*

visualisation permettant d'explorer, d'analyser et de synthétiser de façon interactive des données géolocalisées, en vue de construire de la connaissance » (Dykes and International Cartographic Association, 2007). La géovisualisation combine la visualisation scientifique, la visualisation de l'information, la cartographie, les systèmes d'information géographique (SIG), l'analyse exploratoire des données et bien d'autres méthodes pour explorer, analyser, synthétiser et représenter les données et informations géographiques (Nöllenburg, 2007). C'est pourquoi de nombreux systèmes d'aide à la décision spatiale ont été dotés des techniques de visualisation et d'interfaces dynamiques afin d'associer capacités technologiques et interprétations et savoirs locaux. La production cartographique est accessible et compréhensible grâce à un interface visuel afin de permettre l'exploration (Figure 54), la compréhension, l'analyse et la réutilisation d'une base de donnée complexe, géolocalisée et hétérogène (Saint-Marc, 2017).

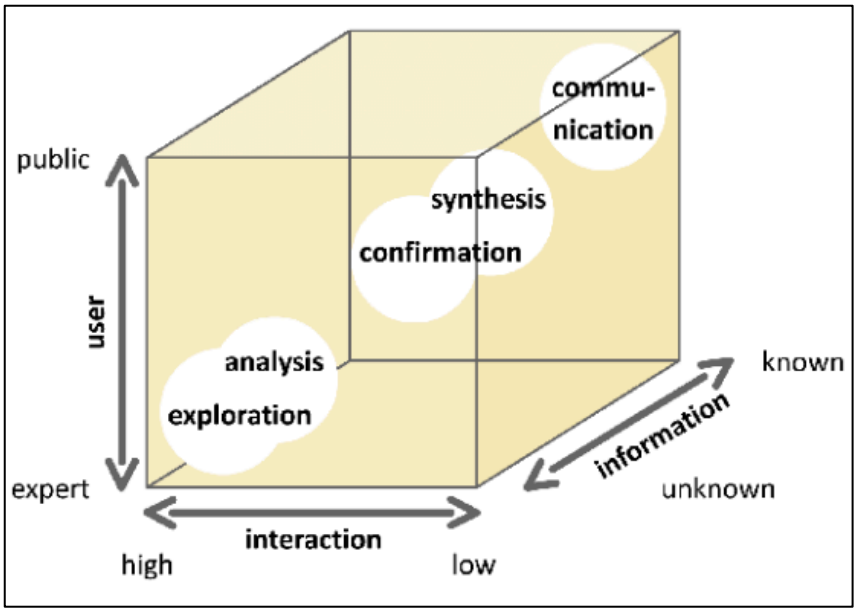

Figure 54 : Les objectifs de la géovisualisation de l'exploration à la communication illustrés dans le cube de géovisualisation (Maceachren and Kraak, 1997)

Grâce à un interface dynamique et à une puissance technique capable de traiter des données complexes, les outils de géovisualisation permettent de communiquer des informations nécessaires au processus d'aide à la décision. En outre, l'interactivité de ces outils permet aux utilisateurs d'être acteurs face à l'outil, en naviguant, en faisant une requête de visualisation, en téléchargeant les données ou en affichant des informations suivant leurs besoins. Les outils de géovisualisation sont donc à la fois des outils de communication mais aussi de production de connaissance en faisant intégralement partie du « *processus de réflexion/connaissance* » (MacEachren et al., 2004). Comme le rappelle Bishop et al. (2013), les neurosciences ont d'ores et déjà démontré que les techniques de visualisation sont essentielles aux processus cognitifs conduisant ainsi une prise de décision (Padilla et al., 2018). La géovisualisation fait donc intégralement partie des systèmes d'aide à la décision spatiale étant donné qu'elle permet de répondre à la fois à des besoins scientifiques et sociétaux pour initier un processus de réflexion et de ce fait, construire et produire une connaissance (Hoarau, 2015).

Plusieurs méthodologies ont permis de produire des outils afin de clarifier les concepts de résilience et de vulnérabilité. Ces outils sont des systèmes d'aide à la décision spatiale et ont permis de décortiquer le concept de résilience. L'objectif de chacune de ces approches est de rendre accessible le concept en créant des liens entre avancées scientifiques et réalité territoriale.

3.3. Des exemples de systèmes spatiaux d'aide à la décision

3.3.1. Des systèmes spatiaux d'aide à la décision pour faire face aux risques climatiques

◊ Le VisAdapt (Johansson et al., 2016)

Une équipe de chercheurs a développé un outil pour aider les habitants des pays nordiques (Danemark, Finlande, Islande, Norvège, Suède) à se prémunir et se préparer aux risques climatiques. L'outil a été développé par des chercheurs du groupe Nordic avec l'aide des assureurs. Les principaux utilisateurs visés sont les propriétaires privés, mais cet outil peut aussi servir aux planificateurs de l'utilisation des terres et aux gestionnaires immobiliers. L'outil, le VisAdapt (Johansson et al., 2016), se propose d'être un guide expliquant comment se préparer aux événements climatiques et météorologiques qui peuvent affecter les maisons individuelles. Il s'agit ici d'un moyen pour les compagnies d'assurance de limiter le montant des indemnités qu'elles devront verser à la suite d'événements naturels dévastateurs. Tout au long du processus de développement, l'outil a été évalué avec les propriétaires (Figure 55) et les compagnies d'assurance sont restées très impliquées pour assurer que les données et méthodes utilisées étaient valides et utiles pour les utilisateurs finaux.

Participating parties	**Type of participation**	**Type of stakeholders**
End-users	Single person test sessions	6 homeowners from Norrköping
	Group test-sessions	35 homeowners from Aarhus, Norrköping and Trondheim
Insurance industry representatives	Recurring workshops	Representatives from 4 Nordic-wide insurance companies
	Workshop	Representatives from 4 Nordic national insurance organisations
Climate change experts	Active involvement in all development stages	Researchers from The Swedish Meteorological and Hydrological Institute, SINTEF building research and Linköping University
Information visualization experts	Active involvement in all development stages	Researchers from Linköping University and Norwegian University of Science and Technology

Figure 55 : Exemple des intervenants dans le processus de construction du VisAdapt, (Johansson et al., 2016)

VisAdapt est basé sur les scénarios régionaux de changement climatique fournis par la Swedish Meteorological and Hydrological Institute. Les stratégies du guide d'adaptation sont collectées auprès des autorités, municipalités et compagnies d'assurance scandinaves. Les données sont compilées dans le Centre for Climate Science and Policy Research et vérifiées par le SINTEF. Les données affichées par défaut évoquent le changement climatique prévu dans la période 2051-2070 et sont basées sur le scénario RCP 8.5 (émissions de GES en augmentation durant ce siècle). Les cartes des risques sont accessibles au public à travers les autorités scandinaves.

L'utilisation est très simple pour permettre à chaque citoyen de l'utiliser. Après avoir inséré son adresse, plusieurs caractéristiques d'habitations sont disponibles. Les caractéristiques que l'on peut configurer sont le toit (feutre ; tuiles ou tôle), la façade (bois ; pierre, métal, fibre végétale ou ciment), les fondations (sous-sol ; fondations suspendues ; dalle), le jardin (forte proportion de zones pavées ; faible proportion) et le paysage (front de mer ; pente ; plat). Il est possible de sélectionner plusieurs caractéristiques (Figure 56) à la fois dans chaque section de façon à obtenir des conseils plus adaptés par la suite. Ainsi en fonction des risques par zones géographiques, chaque citoyen peut visualiser les risques encourus sur son bien immobilier en fonction des matériaux de construction, localisation, âge de la maison, etc.

Figure 56 : Prototype de VisAdapt,(Johansson et al., 2016)

L'intérêt évident de cet outil est de s'adresser directement aux habitants locaux en leur proposant des solutions d'adaptation aux risques naturels liés aux changements climatiques. En fonction des caractéristiques de la maison (Figure 57) et des risques pronostiqués dans la région, l'interface propose des recommandations précises et réalisables pour chaque propriétaire. Cependant l'outil n'est pas efficace au même degré entre les cinq pays d'études, notamment l'utilisation de la carte d'exposition qui n'est utilisable que pour les utilisateurs norvégiens. En

outre les caractéristiques des habitations sont très succinctes, l'évaluation de celles-ci au regard des risques n'est donc pas exhaustive ou assez précise. En outre, l'outil étant destiné aux habitants, un travail sur l'attractivité de l'outil pourrait être envisagé, notamment avec des représentations 2D et 3D des habitations.

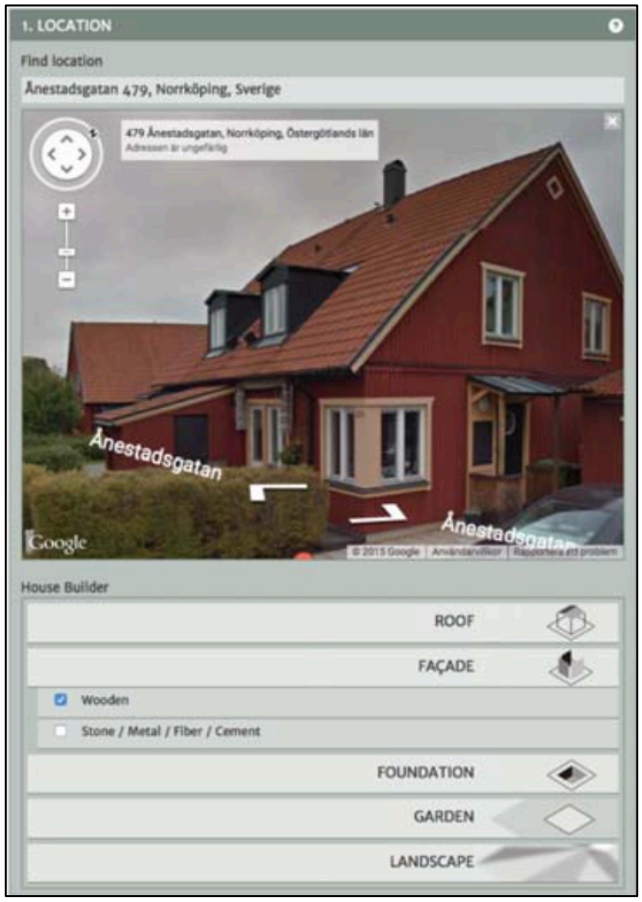

Figure 57 : L'interface pour rentrer les indications de son habitation individuelle (Johansson et al., 2016)

Avantages	Inconvénients
- Outil pour visualiser les risques climatiques - Collaboration scientifiques + assureurs - Utilisateurs visés : propriétaires privés + planificateurs - Visualisation claire des risques climatiques grâce à un interface dynamique - Facilité d'utilisation - Conseils et recommandations fournis par l'interface - Échelle d'analyse du bâti individuel	- Pas la même efficacité à chaque échelle d'analyse - Caractéristiques limitées des maisons individuelles - Manque de précision - Attractivité discutable

Tableau 12 : Avantages et inconvénients du VisAdapt

3.3.2. Modéliser les effets domino dans un contexte de risque d'inondation

◊ L'outil DOMINO (Robert et al., 2017)

Un outil de modélisation de la propagation dans l'espace et dans le temps des effets domino entre les infrastructures critiques (IC) a été développé sur le territoire de la ville de Montréal (Robert and Cloutier, 2012; Robert and Morabito, 2009). Il consiste en une base de données géographique dans laquelle les organisations ont saisi les informations pertinentes relatives à leurs dépendances aux ressources essentielles qu'elles utilisent. Des modules, créés sur la structure des systèmes experts, permettent de combiner les informations provenant des différentes organisations afin d'identifier les interdépendances entre elles. Un simulateur temporel a aussi été développé afin de permettre de visualiser la propagation des effets domino potentiels à la suite d'une défaillance (Figure 58). S'agissant d'un outil géomatique, il est possible de combiner plusieurs couches d'informations dans DOMINO. Les partenaires (gestionnaires des IC et responsables de la sécurité civile) y ont un accès sécurisé et géré selon des niveaux correspondant à leur profil d'utilisateur. Ainsi, chaque organisation a accès à ses propres informations alors que les résultats des simulations sont accessibles à tous les utilisateurs.

En termes de résilience, DOMINO permet des analyses sur les différents paramètres de la résilience. Son implantation sur un territoire demande aux diverses organisations concernées d'échanger des informations sur leur propre capacité de gestion des perturbations. La mise en commun de ces informations permet de réaliser des analyses de cohérence sur un territoire et d'intégrer des conséquences plus larges sur la communauté.

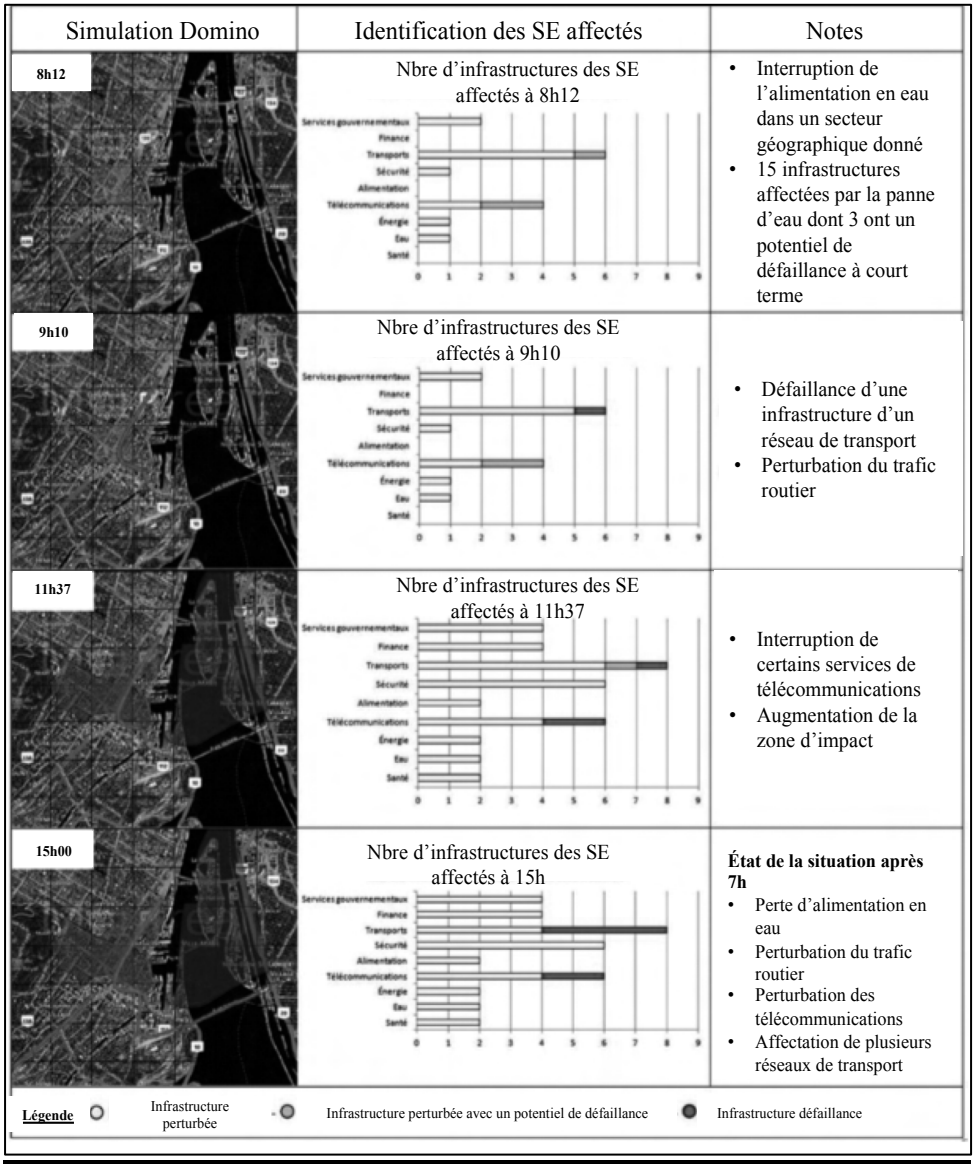

Figure 58 : Visualisation des effets domino à la suite d'une panne d'eau à Montréal (Robert and Cloutier, 2012)

Avantages	Inconvénients
- Outil pour visualiser la propagation des effets dominos - Accessibilité aux partenaires - Identification des interdépendances - Obligation de la part des partenaires d'échanger entre eux pour construire et alimenter l'outil - Possibilité de combiner plusieurs couches d'informations	- Approche centrée sur les infrastructures critiques - Analyse technico-fonctionnelle de la résilience

Tableau 13 : Avantages et inconvénients de l'outil DOMINO

3.3.3. Modéliser la vulnérabilité

◊ Le ViewExposed (Opach and Rød, 2013)

Une étude norvégienne s'est penchée sur la question de la vulnérabilité des territoires face aux changements climatiques (Opach and Rød, 2013). Afin d'éviter une augmentation de la vulnérabilité locale et nationale, les chercheurs ont mis en place un outil ViewExposed dont l'objectif est de renseigner les autorités locales sur les zones les plus vulnérables du territoire norvégien et également les causes de cette vulnérabilité. La méthodologie utilisée s'inspire du travail du SoVi (Cutter et al., 2003) et de l'Université de Caroline du Sud (Tate, 2012). Plusieurs étapes ont été nécessaires afin de créer cet outil :

- Création d'indices de vulnérabilité concernant les tempêtes (StoVI), les inondations (FloVI) et les glissements de terrain (SliVi)
- Travail sur les données et les indices afin de créer un indice compilé, sur la vulnérabilité physique (PhyVI)
- Evaluer la vulnérabilité sociale de la Norvège et création d'un index de vulnérabilité sociale (SoVI)
- Compilation de l'indicateur de vulnérabilité physique et sociale afin de créer un index intégré de vulnérabilité (IntVi)

L'objectif de IntVI est de mettre l'accent sur l'exposition d'une municipalité aux risques naturels et de la mettre en perspective face aux capacités des populations locales à y résister. Concernant le PhyVI, les expositions des municipalités aux risques naturelles est exprimée en pourcentage et dépend du travail des assureurs norvégiens (Norwegian Natural Perils Pool). Au regard des données, les chercheurs ont pu déterminer qu'au cours de la période 1980-2010, 60% des dommages avaient été causés par les tempêtes, 26% par les inondations, 7% par les glissements de terrain et 5% par les ondes de tempêtes (Opach and Rød, 2013)(Opach and Rød, 2013). Concernant le SoVI, l'objectif était d'évaluer la capacité d'adaptation des communes au regard de l'exposition physique. Ainsi, à l'étape suivante, le SoVI a été calculé en utilisant le cadre méthodologique construit pour la Norvège par (Holand et al., 2011). Enfin, PhyVI et SoVI ont été compilé pour créer IntVI. Pour se faire, les coefficients de pondération les plus corrélés avec les données du Norwegian Natural Perils Pool sur les demandes d'indemnisation ont été utilisés: 60% pour le PhyVI et 40% pour le SoVI.

L'outil qui prend la forme d'une interface (Figure 59) a été créé à la fois pour des professionnels, des élus locaux mais aussi des habitants.

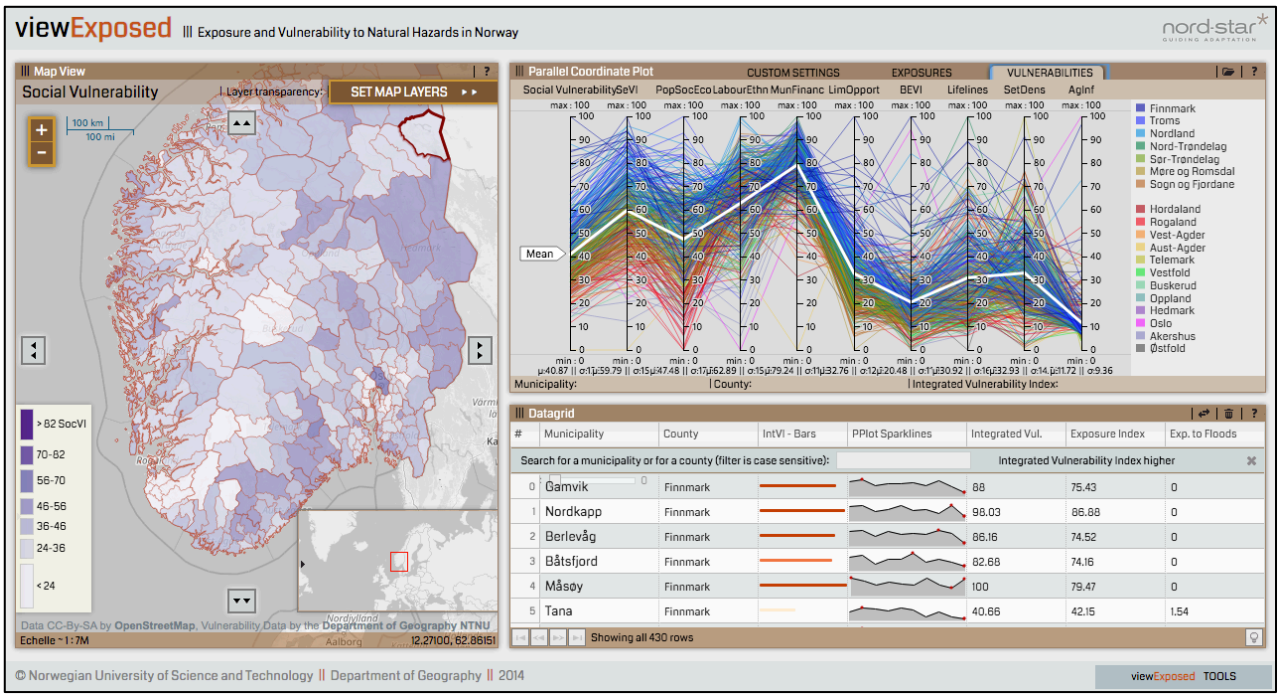

Figure 59 : L'interface d'utilisation de ViewExposed concernant la vulnérabilité sociale (Opach and Rød, 2013)

Elle est le produit d'une collaboration entre des scientifiques et des experts locaux via notamment des workshops (Figure 60) (Opach and Rød, 2013).

Key question	**Do you think that ViewExposed is well equipped with interactive functions?**	
An auxiliary question	*In case of positive feedback*	*In case of negative feedback*
	Please give examples of interactive functions which you have found to be applicable/useful in your daily work tasks.	Please answer whether the application is too complex or perhaps lacks specific interactive functions (… and then go to the next key question).
Key question	**What additional interactive functions or features (e.g., other visualization techniques) not implemented in ViewExposed would enhance/facilitate your work?**	
An auxiliary question	*In case of positive feedback*	*In case of negative feedback*
	What features or functions have you found ViewExposed to be lacking?	Which functions or features might be helpful or useful?
Key question	**What is your impression of ViewExposed's interface design and implementation?**	
An auxiliary question	*In case of positive feedback*	*In case of negative feedback*
	Which features have you found to be valuable?	Which of its features made you confused, and what improvements do you suggest?

Figure 60 : Exemple de questions posées aux acteurs locaux (Opach and Rød, 2013)

Les auteurs de l'interface ont souhaité répondre à deux questions fondamentales : Qui sont les personnes vulnérables ? Et où vivent-elles ? L'objectif est donc d'identifier les régions ayant un haut niveau de vulnérabilité sociale face aux risques environnementaux pour la faire décroitre et ainsi participer à l'amélioration de leur résilience. En outre, la plateforme est ouverte et évolutive étant donné que tout acteur du terrain peut soumettre une réflexion à l'aide de la section « soumettre une remarque » de l'interface.

Bien que tourné autour du concept de vulnérabilité, cet outil intègre également la réponse des gestionnaires et acteurs locaux aux catastrophes naturelles. C'est donc à la fois les vulnérabilités mais également les stratégies de résilience qui sont intégrées. En outre cet outil propose une approche collaborative et participative entre acteurs locaux et experts scientifiques.

Avantages	Inconvénients
- Vulnérabilité face aux changements climatiques - Outil destiné aux autorités locales mais aussi aux habitants - Analyse de plusieurs vulnérabilités : vulnérabilité physique, sociale et une condensation des deux - Intégration de la notion de vulnérabilité : capacités des populations locales à résister - Approche collaborative entre scientifiques et experts locaux - Création d'ateliers - Plateforme évolutive	- Le concept de résilience n'est pas clairement intégré et identifié

Tableau 14 : Avantages et inconvénients de l'outil ViewExposed

Opérationnaliser la résilience passe par plusieurs approches. La conception de systèmes spatiaux d'aide à la décision fait partie de l'une d'elles. Afin de favoriser la compréhension et l'appropriation de concepts complexes et abstraits, ces systèmes ont été dotés des techniques de visualisation et d'interfaces dynamiques. Cette combinaison de cartographie et de visualisation scientifique, de visualisation de l'information, des systèmes d'information géographique (SIG), de l'analyse exploratoire des données se nomme la géovisualisation. Grâce à une interface dynamique et à une puissance technique capable de traiter des données complexes, les outils de géovisualisation permettent de communiquer des informations nécessaires au processus d'aide à la décision. Les différentes approches présentées ci-dessus adoptent ces techniques.

Nous retiendrons plusieurs éléments clefs qui participent à la compréhension des concepts

- ***Les outils destinés aux acteurs et gestionnaires locaux ;***
- ***Les outils co-conçus avec les acteurs et gestionnaires locaux ;***
- ***Les outils intégrant le concept de vulnérabilité et de résilience ;***
- ***L'accessibilité et la prise en main facile de l'outil ;***
- ***Une échelle d'analyse suffisamment fine pour conduire à la prise de décision et à l'action.***

Les limites observées :

- ***Difficulté d'aborder la résilience sous tous les angles ;***
- ***Un choix est souvent fait d'étudier soit la vulnérabilité soit la résilience ;***
- ***Un choix est souvent fait d'analyser les composantes techniques ou urbaines de la résilience ou de la vulnérabilité.***

Parallèlement à la conception de ces systèmes spatiaux d'aide à la décision, des ateliers sont souvent organisés, en parallèle ou a posteriori de la conception de l'outil. Ces ateliers amorcent une démarche collaborative afin de favoriser et d'entraîner une prise de décision. Or, malgré une expertise de la part des acteurs dans le processus d'aide à la décision, ce même processus nécessite l'aide des bénéficiaires (Merad et al., 2014). En d'autres termes, le processus d'aide à la décision à lui-même besoin d'aide de la part des acteurs locaux. C'est pour développer et soutenir le « processus créatif individuel et/ou collectif » de l'aide à la décision qu'une méthodologie collaborative s'est développée.

4. Développer des approches collaboratives pour opérationnaliser la résilience

Le *United Nations International Strategy for Disaster Risk Reduction* (UNISDR) a développé 10 points essentiels afin de créer des villes résilientes. Le point n°1 est de mettre en place des organisations ou coordinations afin de comprendre et réduire les risques, basées sur la participation des citoyens et sociétés civiles (UNISDR, 2012). L'objectif est de construire des actions et alliances locales afin de s'assurer que chaque acteur comprend son rôle dans la réduction et la préparation de stratégies de réduction des risques et de résilience.

4.1. La résilience à travers des approches collaboratives

Faire participer les personnes « locales » ou directement concernées par les problématiques étudiées ne semble pas être nouvelle (Toubin, 2014) et encore moins originale. La source de richesse de faire interagir des personnes de tout horizon confondu rend possible une « *exploration du monde des possibles* » (Callon et al., 2001), enrichissant les discussions, favorisant des regards entrecroisés sur un même sujet, permettant d'être à la fois plus mesuré et plus incisif dans un domaine spécifique. Michel Callon revendique l'apport des savoirs « profanes » dans des questions sociales et sociétales épineuses, les savoirs scientifiques ne pouvant répondre à toutes incertitudes avec pour résultat une remise en question des conclusions « d'experts ». La résilience, concept social et épineux, est donc un sujet qui nécessiterait la confrontation des regards, connaissances, savoirs scientifiques et pratiques, perceptions et interprétations. Pourtant, si la population est bien souvent la première à être impactée par les risques naturels et leur gestion inadaptée, le constat reste un manque d'implication des habitants (Kuhlicke et al., 2011) mais également des services urbains (Toubin, 2014), pourtant acteurs de premier ordre.

Nous défendons l'idée que la création d'un savoir hybride permettant l'implication de tout acteur du territoire, de l'habitant au gestionnaire en passant par le scientifique, permettrait d'opérationnaliser la résilience urbaine grâce à une appropriation du concept et des enjeux des risques urbains.

En effet, la collaboration passe majoritairement par l'appropriation des différentes parties prenantes d'un même sujet de tension et de discussion. La collaboration va donc au-delà du simple échange de connaissances et d'informations (Figure 61) mais permet de « *créer une vision partagée et des stratégies articulées pour faire émerger des intérêts communs dépassant les limite de chaque projet particulier* » (Chrislip, 2002).

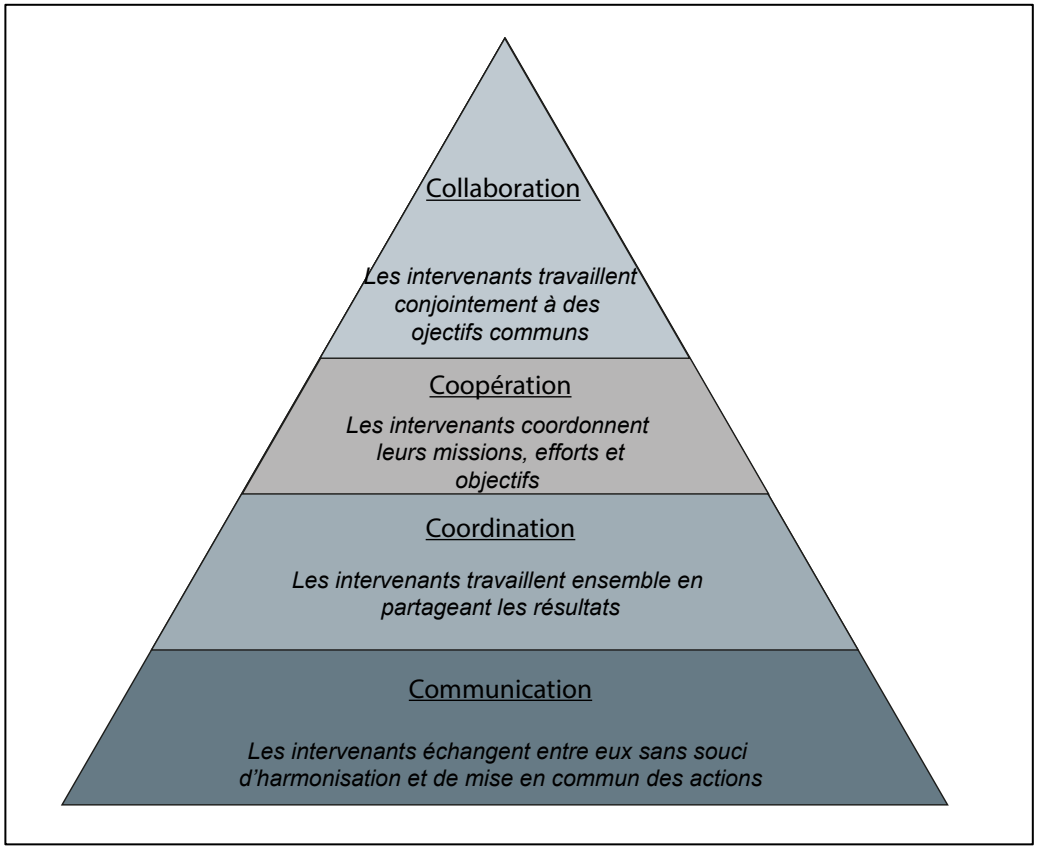

Figure 61 : Processus de collaboration d'après (Toubin, 2014)

Il serait donc bénéfique de créer cette vision partagée et cet engagement autour du concept de résilience, approche qui permettrait également une transition dans les manières de concevoir la ville et d'appréhender les risques en milieux urbains. Nous nous proposons donc de développer des stratégies permettant d'intégrer la résilience de façon à ce qu'elles soient co-conçues avec les acteurs de la ville. Ceci permettrait leur investissement direct mais également l'application de cette stratégie avant ou pendant une crise (Serre et al., 2013). L'implication à l'aune de la création sera la garante d'une utilisation durable de la stratégie de résilience.

Plusieurs expériences d'approches collaboratives entre chercheurs et acteurs urbains peuvent être soulignées. Certaines ont développé des outils, d'autres des principes de résilience. L'approche développée par Benoît Robert à Montréal a pour objectif de mesurer la résilience urbaine en fonction du niveau de perturbation et de la continuité opérationnelle (Robert et al., 2017). La méthodologie a été expérimentée aux côtés des gestionnaires des infrastructures critiques de la ville (Robert and Morabito, 2009). Cette approche collaborative a porté ses fruits en permettant aux scientifiques de valider et d'affiner leurs résultats de l'outil DOMINO au contact des gestionnaires notamment grâce aux exercices de simulations, aux workshops, aux formations organisés conjointement. Ce travail perdure encore aujourd'hui afin d'actualiser l'outil et d'investir durablement dans l'amélioration de la résilience des infrastructures critiques – ou essentielles.

L'approche développée par l'équipe de Wardekker et al. (2010), a permis quant à elle de co-définir six principes de résiliences afin de favoriser la réponse d'une ville face à la montée des eaux (Rotterdam). L'*homéostasie* (clarifier les responsabilités, les retours d'expérience, les

stratégies de gestion des risques), *l'omnivorie* (diversification des réseaux), le *haut flux* (planifier de façon à favoriser la reconversion rapide des activités et des sols), la planification (permettre aux populations de s'auto-gérer, d'être auto-suffisants), *l'effet-tampon* (développer des espaces qui absorbent les premiers impacts des perturbations), et la *redondance* (dupliquer les fonctions vitales) sont autant de principes qui permettent une meilleure résilience urbaine.

> ***Le concept de la résilience urbaine fait appel à des enjeux multiples, transversaux et interprétatifs nécessitant d'avoir une approche transdisciplinaire permettant aux différents acteurs de la ville d'être intégrés dès la phase de conception des stratégies de résilience. Reconnaissant par là même qu'il ne peut exister une seule et bonne réponse à la question des risques urbains, les approches systémiques et collaboratives permettent de formuler et de répondre aux difficultés rencontrées en mettant en perspective les différents savoirs académiques et pratiques des acteurs. En outre, ce travail collaboratif est le garant d'une acceptation et d'une appropriation d'un concept encore abstrait sur bien des points.***

4.1.1. Le processus de collaboration dans la gestion des risques

Depuis quelques années, la question des risques et plus particulièrement des risques environnementaux revient fréquemment sur la scène politique et publique. Grâce aux termes « justice environnementale », « développement durable », « équité environnementale », ou encore « services écosystémiques », les questions et les intérêts des citoyens se font plus présents. Impliqués de plus en plus dans des questions environnementales mais aussi humaines et citoyennes, les populations sont responsabilisées sur leur mode de vie. L'environnement devient dès lors bien commun, notamment en Suède où chaque citoyen peut alors jouir comme il l'entend de la nature mais où il est aussi responsable de ses actions. Des évènements tels que les Marches pour le Climat depuis 2015, soulignent ce sentiment de responsabilité individuelle et collective sur des thématiques environnementales. Cette transition dans la pratique et la conscience environnementale dénote d'une implication de plus en plus forte des parties prenantes.

Or, ces implications ne peuvent perdurer que si un travail de transparence, de clarté, de communication et de consensus s'établi entre les différents acteurs (Mustajoki et al., 2004). Car du fait de la complexité des enjeux environnementaux, liés eux-mêmes aux enjeux urbains, la communication, la compréhension mais aussi nécessairement l'intégration et l'action ne peuvent exister que par l'accompagnement des experts et acteurs locaux.

Pour s'approprier des concepts aussi complexes et abstraits que les risques ou encore la résilience, il faut être en mesure de les exprimer et par la suite de les traduire en termes d'objectifs précis à atteindre (Bertacchini, 2010). Ainsi si l'on veut traduire un concept en action précise, un travail de clarification des enjeux, des usages, des objectifs est nécessaire. Ce travail est primordial pour s'assurer de l'implication des parties prenantes dans un problème qui est avant tout commun et pour augmenter les chances d'apporter des réponses et des solutions réelles et concrètes à une complexité multiple.

4.1.2. Impliquer les acteurs locaux pour une meilleure acceptation

C'est donc un changement de paradigme qui doit s'opérer afin d'intégrer les parties prenantes. Si cette transition peut paraître insurmontable pour certains, non productif pour d'autres, il est pourtant avéré que la construction d'un savoir commun aux experts et profanes « *permet de réduire la complexité, de prendre en compte les intérêts de chacun, mais aussi de favoriser l'acceptation et l'appropriation des solutions* » (Toubin, 2014). Ainsi malgré les difficultés pour instaurer cette confiance, cette collaboration, ce dialogue commun, le résultat est une meilleure intégration et acceptation du travail des experts. En outre, étant donné que ces sujets tels que les questions environnementales, les risques urbains, le changement climatique, touchent et impliquent toutes les parties prenantes, les intégrer permet non seulement d'aborder de nouveaux points de vue et approches mais aussi de construire une équité de connaissances. Ainsi donc, l'intégration des différents acteurs a un impact doublement positif, et permet de répondre aux objectifs d'un projet en améliorant ses propositions, mais est également un objectif en soi en répondant aux désirs de la concertation.

Il est alors question pour les gestionnaires de « *s'assouplir pour s'adapter* » et de *« négocier pour convaincre* » (Joerin, 1997) afin de formaliser dès le début du projet une vision et un savoir co-construits entre les différents acteurs. De ce fait, le résultat sera d'autant plus légitime et surtout pertinent (Desthieux, 2005). Ainsi, par le dialogue, le compromis, la sensibilisation des individus, les stratégies d'adaptation face aux risques auront encore plus de chances d'avoir un impact positif et réel sur le territoire et sa population.

L'opérationnalisation de la résilience passe donc nécessairement par l'implication des multiples acteurs afin de proposer un urbanisme cohérent et des stratégies d'adaptation pour répondre au mieux à la menace des risques croissants en milieux urbains.

Les politiques publiques peuvent dès lors jouer un rôle essentiel à la mise en place d'approches collaboratives. En effet, il est aujourd'hui obligatoire de mettre en place une forme de concertation lors de la conception de chaque nouveau projet urbain (Mermet, 2006). La concertation, « *action (...) partiellement négociée, partiellement débattue et délibérée* » (Mermet, 2006), se retrouve alors comme condition *sine qua non* d'un projet du territoire, condition protégée par des codes de lois tel que la « *loi solidarité et renouvellement urbain (SRU) et démocratie de proximité en 2002, quatrième principe fondamental (2002) du code de l'Environnement (titre II du livre 1er entièrement consacré à « l'information et la participation*

des citoyens ») » (Toubin, 2014). A Paris, le portail *Imaginons.paris*[2] concentre les informations et les concertations sur tous les projets urbains en cours de la Ville de Paris. Chaque citoyen peut dès lors se renseigner grâce aux enquêtes publiques mais également donner son avis sur les aménagements envisagés. En outre, la ville a également mis en place des concertations publiques sur des sujets « sensibles » tels que le plan climat de la ville. Chaque citoyen pouvait, dans un temps limité, donner son avis et voter pour le plan climat. Le résultat a été de 95,95% de oui, entraînant une proposition de la ville de s'investir durablement en devenant « Volontaire du Climat » et d'agir aux côtés de la Ville. Ces outils participent largement à l'implication massive des parties prenantes en favorisant un apprentissage collectif à large échelle. La concertation favorise donc des nouveaux outils et structures de gouvernance avec pour objectif d'élargir le champ et les sources de connaissances.

Cette évolution dans la pratique de la gouvernance peut dès lors être qualifiée d'intelligence territoriale (Toubin, 2014) ayant « *pour objectif de contribuer à la rénovation de la gouvernance locale* (en impliquant) *des processus d'interaction, des méthodes et des outils de connaissance et d'action* » (Bertacchini, 2010). L'intégration des acteurs locaux au cœur de sujets controversés « *permet la mobilisation des compétences locales autour d'un objectif partagé et dans l'hypothèse de compétences complémentaires à réunir, à faciliter leur acquisition par un mode d'apprentissage approprié* » (Bertacchini, 2010).

> ***Les approches collaboratives ont permis aux acteurs locaux de participer, partager et communiquer sur leurs propres expériences autour de sujets complexes. Notre démarche est donc d'adapter ces approches collaboratives à la thématique des risques urbains et au concept de résilience.***

4.1.3. Participation ou collaboration ?

Il nous a semblé important de dissocier les différents acteurs des uns des autres mais également les outils qui existent d'ores et déjà pour favoriser la collaboration entre différents acteurs.

Tout d'abord, lorsque l'on parle de collaboration et de concertation, la question se pose à qui ? auprès de qui ? Doit-on, à chaque étape du projet, intégrer chaque partie prenante ?

Il est ici nécessaire d'établir la différenciation entre participation et collaboration. Lorsque l'on parle de participation – citoyenne ou autre – la décision est « *ouverte à des individus et des groupes qui ne sont pas en charge d'un pouvoir de décision formalisé* » alors que la collaboration est la mobilisation non plus d'un seul « *mais plusieurs individus ou groupes, intégrés sur un pied d'égalité* » (Joliveau, 2004). Il faut comprendre ici que lorsque le grand public est intégré aux débats et questionnements sur des sujets complexes, il est alors question

[2] https://www.imaginons.paris/

de participation car il est rarement question d'égalité de décision face aux décideurs officiels. En revanche lorsque plusieurs décideurs sont confrontés les uns aux autres, même au-delà de la hiérarchie officielle, nous pouvons parler de collaboration, collaboration effective à plusieurs degrés (Figure 62). La pratique de la recherche-action vise à favoriser cette collaboration à tous les niveaux et aux différentes étapes de l'apprentissage, de la décision et de l'action. Cette nouvelle forme de recherche combinant experts et chercheurs permet de cadrer des questionnements grâce à des notions scientifiques mais également de répondre pratiquement aux problèmes grâce à l'expérience des experts – privés et/ou publics.

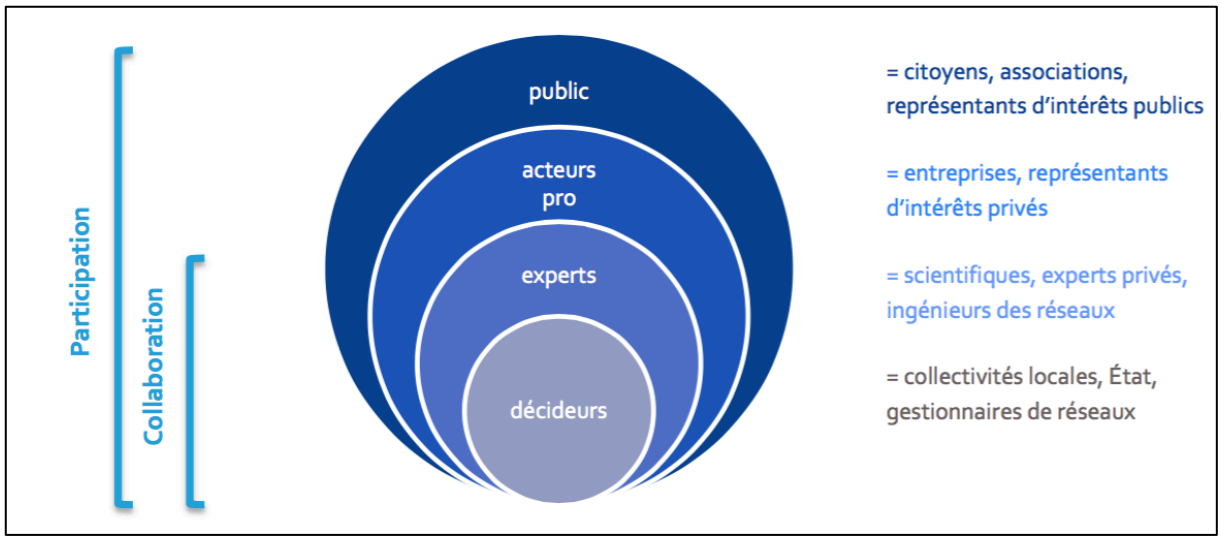

Figure 62 : Entre participation et collaboration, quels acteurs ? (Toubin, 2014)

Cependant, le dénominateur commun à ces deux approches – participative et/ou collaborative – reste un processus d'apprentissage et d'innovation (Rijke et al., 2013) combinant différentes sources de connaissances, des savoirs tacites, explicites, expérientiels ou académiques. C'est tout un réseau de connaissances et de relations qui se construit au fur et à mesure des échanges, des expériences communes, des émulations diverses. Chaque acteur acquiert une place essentielle dans les échanges et, tel un canevas réalisé avec minutie, rempli son rôle. Des études ont cherché à comprendre la place qu'occupait chaque partie prenante dans les échanges, quelles étaient les forces en action et les interactions en fonction des rôles attribués – parfois officiellement, parfois officieusement. Ces études ont mis en avant l'importance d'un *Broker*, un intermédiaire, un médiateur qui serait alors la « colle » entre les différentes parties prenantes (Bodin et al., 2006). Ce rôle d'entre deux permettrait une meilleure transmission de l'information ce qui engendrerait une plus grande capacité d'innovation et d'adaptation. Ainsi, des intermédiaires qui (re)lieraient les acteurs entre eux seraient source de respect, de confiance et par là même d'une meilleure collaboration. Il est donc certain que certaines formules et outils de collaboration favorise le dialogue et la compréhension.

4.2. Des approches favorisant la collaboration entre acteurs locaux et experts scientifiques

◊ Améliorer la résilience urbaine par un diagnostic collaboratif (Toubin, 2014)

Dans sa thèse, Marie Toubin développer une méthodologie pour contribuer à l'amélioration des conditions de résilience urbaine et plus particulièrement la résilience des réseaux urbains. Son analyse des interactions et interdépendances des réseaux urbains a permis de mettre en lumière les fragilités intrinsèques aux systèmes urbains et à leur gestion en cas de crise. Face aux enjeux observés, l'objectif de la recherche a donc été de développer des approches méthodologiques et des outils pour aider les gestionnaires de services urbains à identifier et caractériser les interdépendances techniques et organisationnels afin d'assurer la continuité de service malgré une perturbation.

La démarche s'est construite en intégrant les gestionnaires principaux des services urbains de la Ville de Paris (Figure 63 et Figure 64).

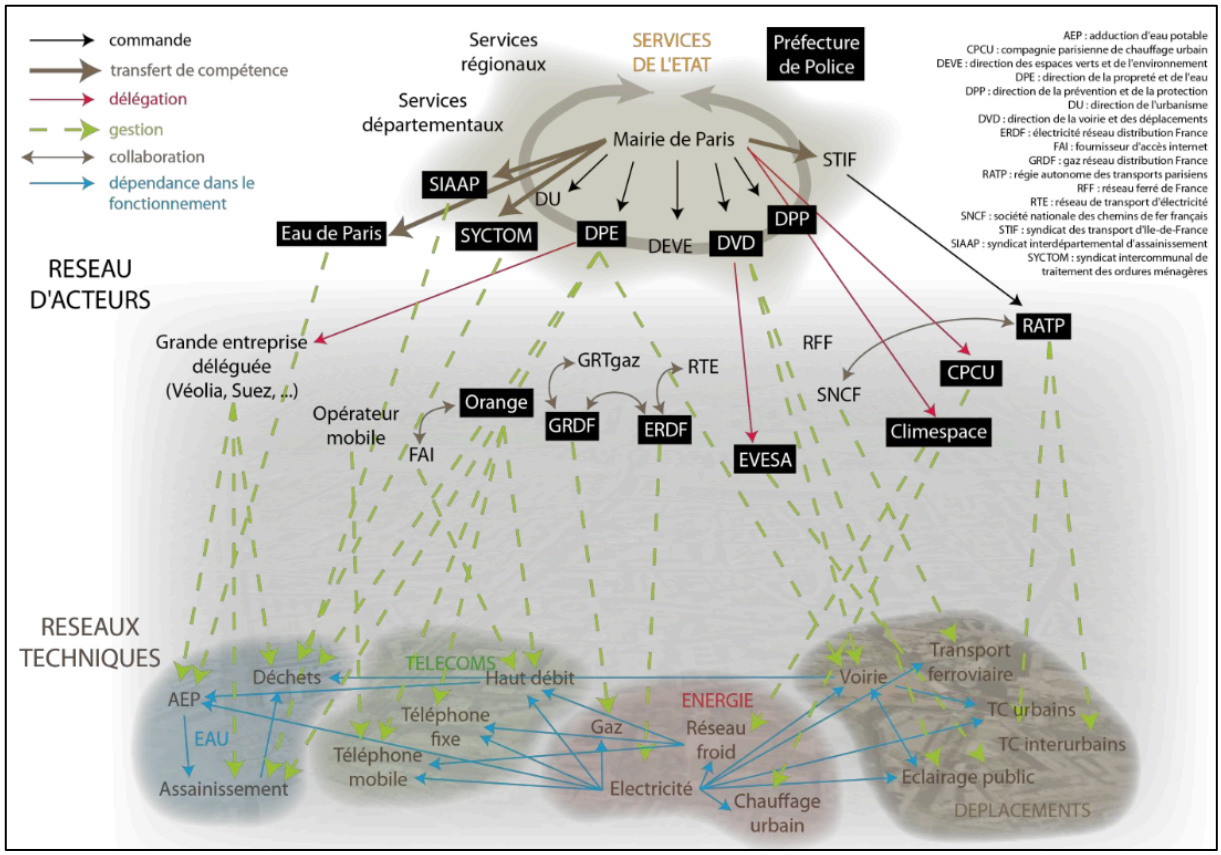

Figure 63 : Cartographie des services urbains parisiens (Toubin, 2014)

Désignation	Service principal fourni	Rattachement	Compétence	Périmètre
ERDF	électricité	Filiale à 100% d'EDF	Gestion du réseau public de distribution d'électricité	Réseau piloté à l'échelle régionale avec interconnexions nationales et internationales
GRDF	gaz	Filiale à 100% de GDF Suez	Activités de distribution de gaz naturel	Réseau piloté à l'échelle régionale avec interconnexions nationales et internationales
CPCU	chauffage	Filiale de la Ville de Paris et Cofely (groupe GDF Suez)	Délégation de service public de distribution de chaleur de la Ville de Paris	Réseau couvrant Paris intra-muros pour environ 1/4 des besoins en chaleur
Climespace	climatisation	Filiale de GDF Suez	Livraison d'eau froide par réseau aux bureaux, entreprises industrielles, habitats pour la climatisation et le refroidissement	Réseau limité à certains quartiers de Paris intra-muros, réseau de Bercy indépendant du réseau central
Eau de Paris	eau potable	Ville de Paris	Gestion du service public de la production à la distribution de l'eau à Paris	Réseau couvrant l'intégralité de Paris intra-muros mais avec des installations en dehors du territoire
SAP	assainissement	DPE	Assurer l'hygiène et la salubrité publique (collecte des eaux usées), garantir la qualité de l'environnement	Réseau couvrant l'intégralité de Paris intra-muros et interconnecté avec le réseau du SIAAP
SIAAP	assainissement	4 départements : Paris, Hauts-de-Seine, Seine-Saint-Denis et Val-de-Marne	Service public de l'assainissement (transport et traitement)	Réseau couvrant les arrondissements parisiens, la quasi-totalité des communes de la petite couronne et quelques communes de grande couronne
Propreté	collecte déchets	DPE	Collecte des ordures ménagères et nettoiement des rues	Réseau couvrant l'intégralité de Paris intra-muros (une direction par arrondissement)
SYCTOM	traitement déchets	Adhésion des communes	Traitement et valorisation des ordures ménagères	Réseau couvrant l'intégralité de Paris intra-muros, une bonne part de la petite couronne, disposant d'installations réparties sur le territoire et en interaction avec les services de collecte des déchets de la Ville de Paris entre autres
PC Lutece	régulation du trafic	DVD	Gestion des feux de l'ensemble des voies et carrefours parisiens	Réseau de régulation couvrant l'ensemble du réseau viaire intra-muros
PC Berlier	régulation du trafic	DVD	Indication des temps de parcours et surveillance incendie du réseau	Réseau de régulation couvrant l'intégralité du périphérique, des voies sur berge et des tunnels
EVESA	éclairage		Éclairage public et maintenance de la SLT de la Ville de Paris	Réseau couvrant l'intégralité de Paris intra-muros mais avec des installations en dehors du territoire
Fonctionnelle	viabilité	DPE	Maintien de la viabilité (nettoiement, viabilité hivernale, voies sur berge et périphérique)	Réseau couvrant l'intégralité de Paris intra-muros
Voirie	déplacement	Espace public	Permettre le déplacement en véhicules et à pied, repose sur plusieurs services	
RATP	transport	Contrats d'objectifs avec le STIF	Exploitation du réseau de transport en commun de personnes par bus, métro, tramway et RER	Réseau couvrant l'ensemble du service de métro intra-muros et également en Ile de France, en interaction avec les réseaux bus Optile et la SNCF
Orange	télécommunications		Anciennement service public français de télécommunications (France Télécom) : opérateur de téléphonie fixe, mobile et fournisseur d'accès internet	Réseau couvrant l'intégralité de Paris intra-muros en interaction avec les autres opérateurs télécoms

Figure 64 : Services urbains rencontrés lors du travail de recherche menée par (Toubin, 2014)

La méthodologie a permis de construire des entretiens afin d'évaluer la criticité des ressources nécessaires au bon fonctionnement du système (Figure 65). Il a donc été possible de hiérarchiser les ressources en fonction de leur importance et de leur utilisation.

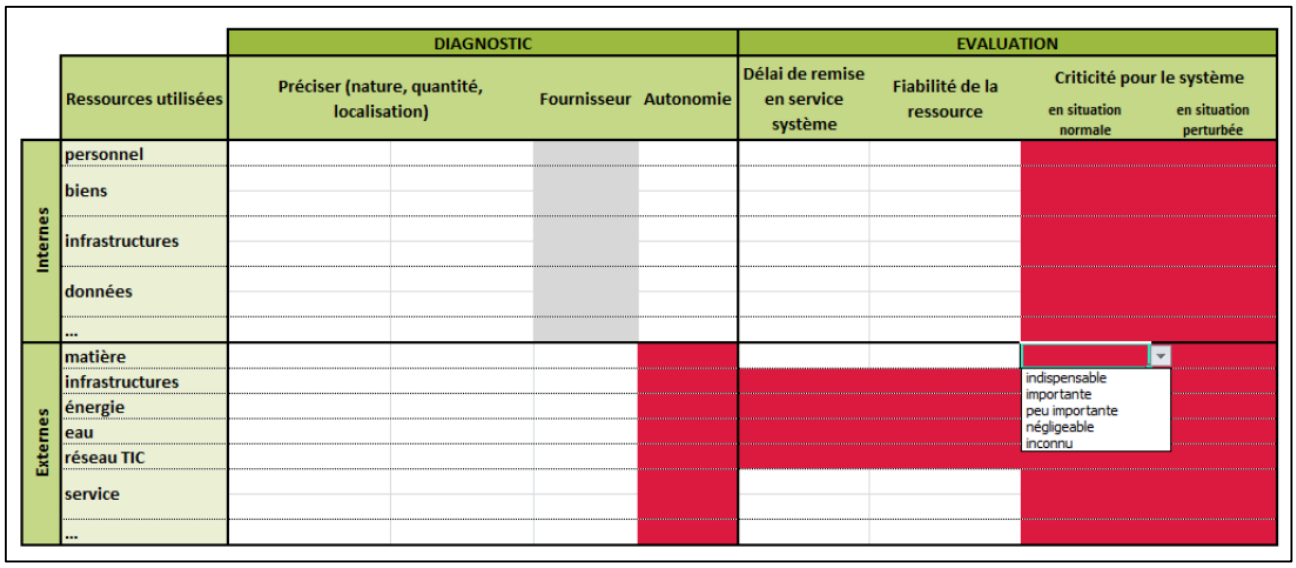

Figure 65 : Grille de dépendance des ressources (Toubin, 2014)

De la même façon, une grille pour déterminer les ressources produites pour les utilisateurs a été créée (Figure 66).

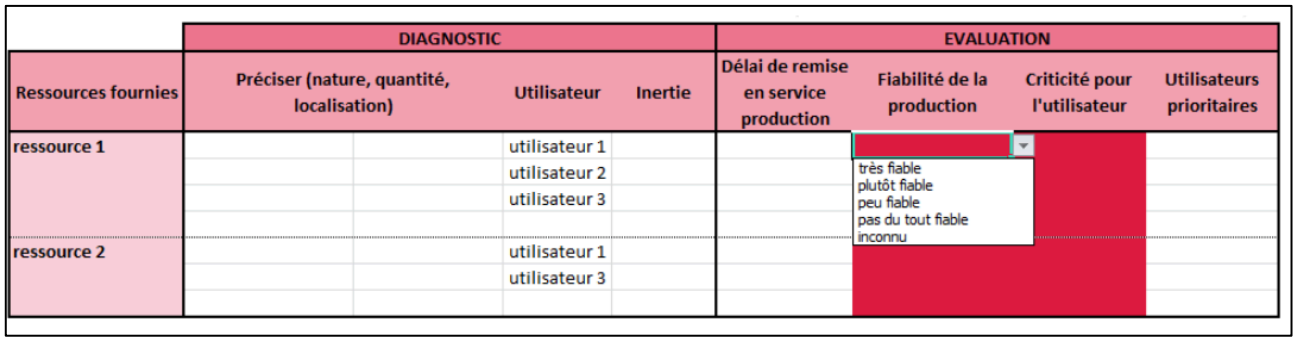

Figure 66 : Grille d'évaluation des ressources produites (Toubin, 2014)

Cette recherche a permis de dresser et analyser les interdépendances des réseaux urbains parisiens. Elle souligne certaines dépendances, notamment celles à l'électricité, aux télécommunications ou aux déplacements. L'approche collaborative a permis d'impliquer les gestionnaires dans la réflexion des stratégies afin d'atténuer ou du moins gérer ces interdépendances. En outre, le processus de collaboration a permis d'illustrer la nécessité de dépasser des approches isolées mais au contraire de favoriser une vision commune. L'imbrication des échelles mais aussi des services rendent la coopération et la transparence entre opérateurs et décideurs indispensables pour la construction d'une ville plus résiliente.

Avantages	Inconvénients
- Implication des gestionnaires d'infrastructures critiques dans l'analyse de la résilience - Développement d'une culture de résilience - Développement d'une analyse croisée entre les gestionnaires - Développement d'une analyse commune du risque d'inondation - Confrontation entre les différentes échelles d'analyse	- Analyse centrée autour de la résilience des infrastructures critiques et des réseaux urbains

Tableau 15 : Avantages et inconvénients de l'approche développée par (Toubin, 2014)

◊ The City Resilient Framework (100 Resilient Cities, n.d.)

Créé par la fondation Rockfeller en 2013, les 100 Villes Résilientes ont pour objectif d'aider les villes du monde entier à être davantage résilientes face aux enjeux physiques, sociaux et économiques du 21eme siècle. Ce modèle permet aux villes membres de bénéficier d'accompagnement technologique, financier, technique et d'une expertise scientifique afin d'analyser, planifier et mettre en œuvre des stratégies de résilience urbaine. Le 100RC soutient l'adoption et l'intégration d'une vision de la résilience qui inclut non seulement les catastrophes naturelles - tremblements de terre, incendies, inondations, etc. - mais aussi les tensions qui affaiblissent le tissu urbain d'une manière quotidienne ou cyclique. Ces contraintes ou stress peuvent par exemple être un chômage élevé ; un système de transport public surchargé ou inefficace ; une violence endémique ; ou des pénuries chroniques de nourriture et d'eau. En s'attaquant à la fois aux chocs et aux stress, une ville devient plus apte à réagir aux événements indésirables et, dans l'ensemble, elle est mieux à même de fournir des fonctions de base, à la fois bonnes et mauvaises, à toutes les populations.

Les villes du réseau 100RC disposent des ressources nécessaires pour développer une feuille de route vers la résilience selon quatre angles d'approche :

- Orientation financière et logistique pour l'établissement d'un nouveau poste innovant dans le gouvernement de la ville, un chef de la résilience, qui dirigera les efforts de résilience de la ville
- Soutien d'experts pour le développement d'une solide stratégie de résilience
- Accès aux solutions, aux fournisseurs de services et aux partenaires des secteurs privé, public et des ONG qui peuvent les aider à développer et mettre en œuvre leurs stratégies de résilience
- L'adhésion à un réseau mondial de villes membres qui peuvent apprendre et s'entraider.

En outre, chaque ville du réseau bénéficie de l'aide d'un Chief Resilience Officer, nommé et finance par la fondation et responsable de la mise en place d'une politique de résilience. Ses

objectifs sont de travailler avec les services municipaux des villes afin d'améliorer la communication entre les réseaux, réunir les acteurs concernés afin de les sensibiliser aux enjeux de la mise en place d'une ville résiliente, co-construire une stratégie globale de résilience et amorcer une réflexion pour développer une gouvernance développant les principes de résilience.

Le choix d'agir à l'échelle métropolitaine s'explique par la volonté de répondre à des enjeux précis, impact du changement climatique, inadéquation des transports, accessibilité à l'habitat, cohésion sociale, risques urbains n'en étant que des exemples (Metropolis Observatory and 100 Resilient Cities, 2017). Soutenant à l'heure d'aujourd'hui 44 villes aussi diverses que Paris, San Francisco, El Paso, Glasgow, Amman, ou encore Tulsa, le consortium tente d'apporter des réponses adaptés et spécifiques aux problèmes que rencontrent ces villes suivant un modèle conceptuel de résilience (Figure 67). Définissant la résilience comme la capacité d'individus, de communautés, d'institutions, d'entreprises et de systèmes urbains à survivre, s'adapter et évoluer, peu importe les types de stress chroniques ou de chocs qu'ils peuvent rencontrer (100 Resilient Cities, s. d.) et défendant l'idée d'une approche holistique, le 100RC a construit un cadre définissant les caractéristiques de la résilience urbaine.

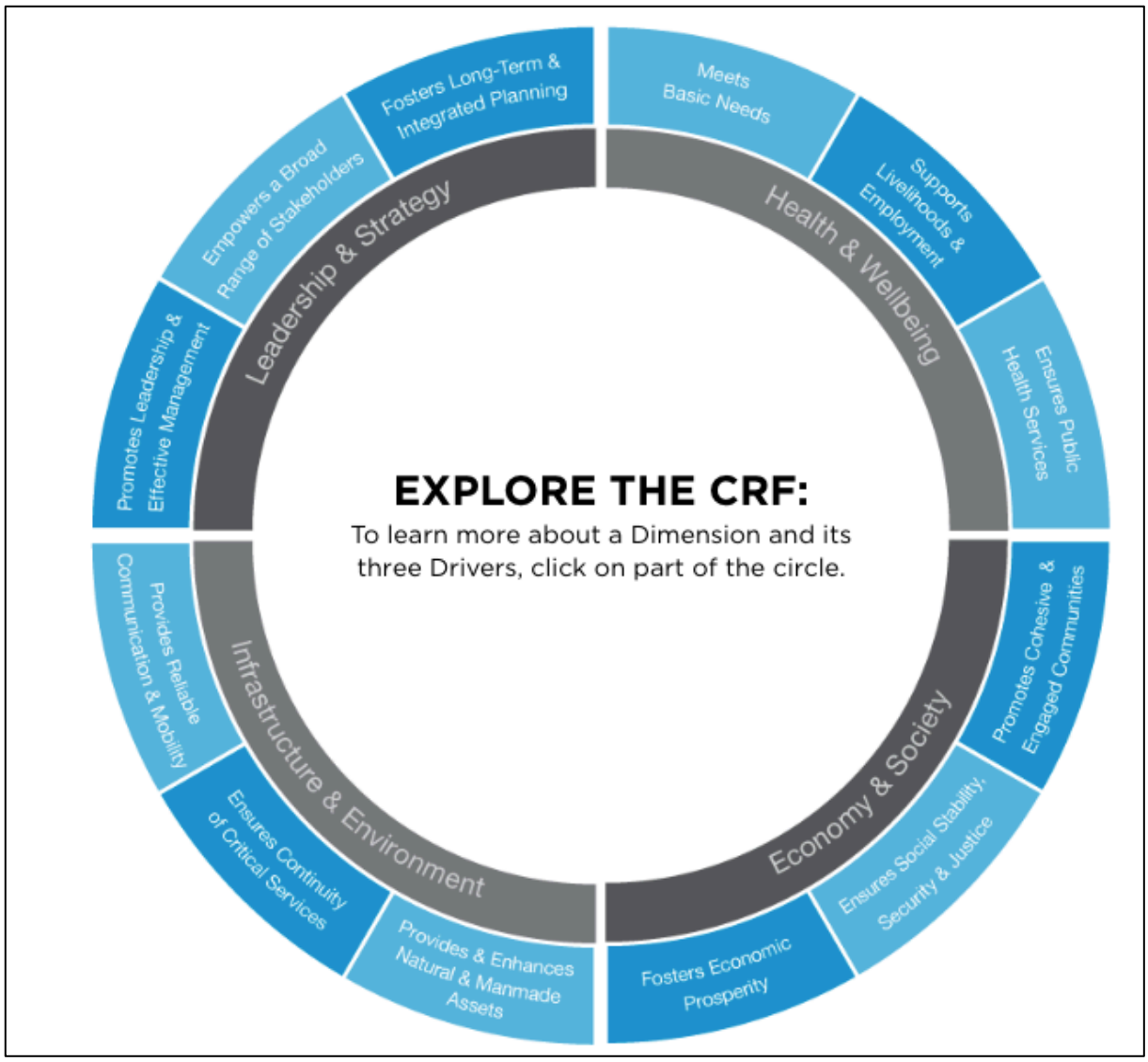

Figure 67 : The 100 Resilient Cities Framework, (100 Resilient Cities, s. d.)

Ce modèle est ensuite adapté à chaque ville, ses risques, sa culture du risque, ses enjeux, ses acteurs, etc. Nous pouvons prendre l'exemple de la stratégie appliquée à la ville de Vejle au Danemark (Figure 68) et menée par Jonas Kroustrup, Boris Schonfeldt, Ulla Varneskov, Anne Kristensen et Johanes Gregersen en 2013.

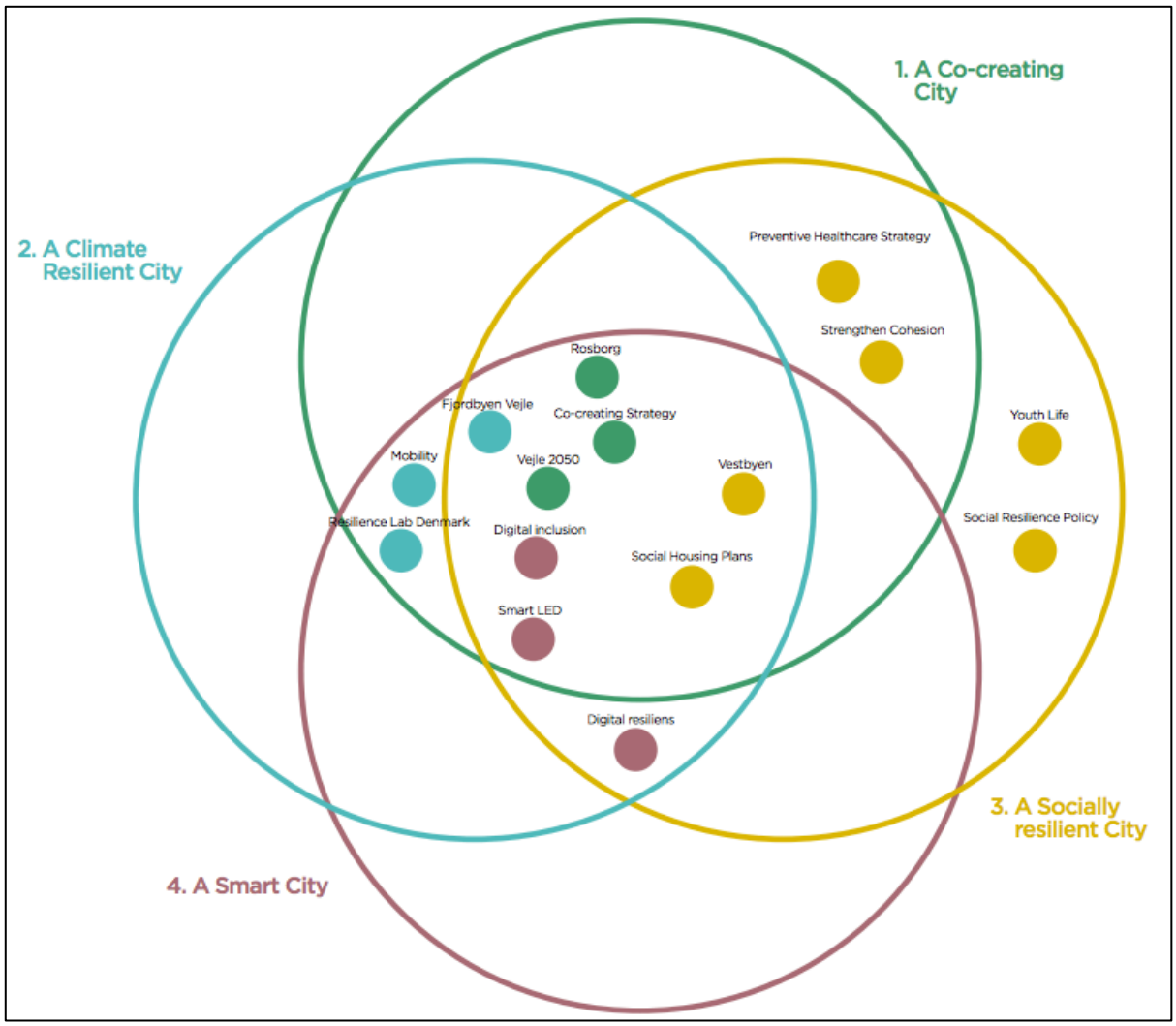

Figure 68 : Extrait de la politique de résilience pour la ville de Vejle, (100 Resilient Cities, s. d.)

Avec ses 111 000 habitants, Vejle est la 6ème ville la plus grande du Danemark et est un exemple parfait d'une ville scandinave moyenne. Située sur un fjord, la ville fait notamment face à un risque d'inondation réel et croissant. En effet, d'ici 2050 la ville attend une élévation d'eau du fjord de 25 cm et d'ici 2100 de 69cm (Resilient Vejle and 100 Resilient Cities, 2013). Pour faire face à un risque d'inondation lié aux tempêtes et à l'augmentation du niveau d'eau du fjord, les experts ont proposé la création du « Fjordbyen », un laboratoire afin d'améliorer la gestion de l'eau en proposant des solutions innovantes et intégrées telles que la modernisation des espaces publics. L'objectif est d'encourager la croissance économique tout en réduisant le risque. Les premières mesures proposées pour réduire le risque d'inondation sont les suivantes :

- Concevoir des défenses contre les inondations pour encourager l'investissement, le développement et valeur immobilière ;
- Utiliser Østbykvarteret comme zone de démonstration où les interventions de gestion des inondations ont une valeur récréative et communautaire ;
- Protéger les zones de l'arrière-pays de la rivière Grejs en installant des solutions d'inondation intégrées le long des routes pour diminuer le débit d'eau.

L'idée développée par cette stratégie à long terme est d'apprendre à vivre avec et autour de l'eau, en réduisant le risque inondation par des infrastructures à double utilisation – service/loisir et protection des inondations.

Si ce genre de stratégie reste très générale, l'approche des 100 Villes Résilientes a le mérite d'associer acteurs locaux et chercheurs sur la résilience. Malgré un cadre conceptuel très global, chaque ville co-construit sa stratégie de résilience entre aide internationale et acteurs locaux. En outre cette approche permet d'intégrer tout type de risques, quotidiens ou exceptionnels, humains ou naturels, matériels ou immatériels. Un avantage non négligeable est également de démocratiser et vulgariser la terminologie de résilience terme qui, comme nous l'avons évoqué précédemment, est encore flou et abstrait pour beaucoup d'acteurs.

Avantages	Inconvénients
- Intégration des différentes thématiques de résilience : leadership, infrastructure et environnement, santé et bien-être, économie et société - Intégration des acteurs locaux - Échelle métropolitaine - Développement d'une culture locale de résilience - Approche multi-risques (catastrophes naturelles + stress quotidiens). Ex : stratégie de la ville de Paris https://www.paris.fr/pages/paris-résiliente-4264 - Approche de la résilience sur le long terme	- Pas de mesure de résilience - Cadre conceptuel très global

Tableau 16 : Avantages et inconvénients des 100 Villes résilientes

◊ Participation in flood risk management and the potential of citizen observatories, a governance analysis (Wehn et al., 2015)

La Directive Européenne sur les inondations 2007/60/EC expose la nécessité d'intégrer les acteurs locaux et citoyens dans un processus de participation afin de s'assurer de leur implication dans la création d'une stratégie de gestion du risque inondation. Des moyens novateurs, tels que les observatoires des citoyens rendus possibles par les technologies de l'information et de la communication (TIC), ont le potentiel de donner aux citoyens un rôle sensiblement nouveau dans le processus décisionnel. Cette étude présente un cadre élaboré pour analyser le potentiel de participation par le biais d'observatoires citoyens utilisant les TIC et entreprend une analyse comparative du Royaume-Uni, des Pays-Bas et de l'Italie.

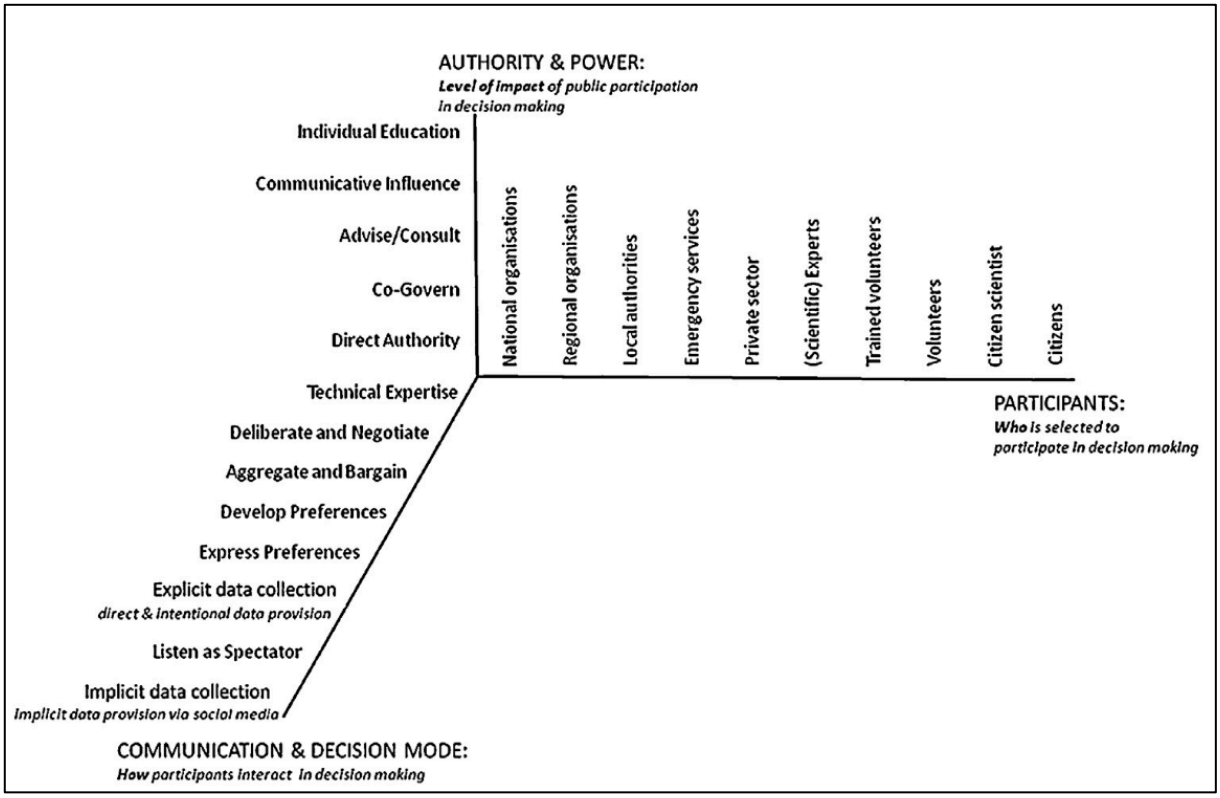

Figure 69 : Participation des citoyens par le biais d'observatoires basés sur les TIC (Wehn et al., 2015)

Après avoir analysé la transposition des obligations légales en matière de participation citoyenne, l'étude montre que la mise en œuvre est limitée lorsqu'on examine à la fois les rôles respectifs et les types d'interactions entre les citoyens et les autorités et l'impact de la participation citoyenne sur le processus décisionnel. Les différentes autorités ont des perceptions différentes de la participation des citoyens à la gestion des risques d'inondation en ce qui concerne leurs rôles et leur influence. Les résultats indiquent également que ces perceptions sont liées à l'importance que les autorités accordent aux différentes étapes du cycle des catastrophes. Cette compréhension est cruciale pour identifier le potentiel des observatoires citoyens afin de favoriser l'engagement et la participation des citoyens.

L'étude met davantage en place des modèles d'analyse de la participation citoyenne dans la gestion du risque inondation qu'elle ne met en place elle-même une stratégie afin de les impliquer davantage. C'est donc davantage un modèle d'évaluation de la participation citoyenne qui est ici développé.

Avantages	Inconvénients
- Création d'outils participatifs sous la forme d'observatoires citoyens - Mise en perspective de la confrontation acteurs politiques et citoyens sur la question du risque d'inondation - Mise en exergue de la nécessité du processus de compréhension quant à la bonne perception des risques	- Pas de conseils délivrés pour développer une approche participative et/ou collaborative - Approche qui se limite à la description et l'analyse des processus sans passer à l'action

Tableau 17 : Avantages et inconvénients des observatoires de participation citoyenne

L'approche collaborative dans un processus d'aide à la décision permet de créer un lien entre les experts et les utilisateurs finaux. Intégrer les acteurs locaux au début de la conception d'un système spatial d'aide à la décision prend tout son sens lorsqu'il est question de sujets, thématiques et concepts controversés et complexes. Au-delà de la création d'une connaissance commune entre experts et acteurs, le processus collaboratif favorise l'acceptation et l'adoption d'outils, approches et méthodologies.

Les outils existants dans la thématique des risques et de la résilience apportent plusieurs types de réflexion :

- ***Intégrer les acteurs permet de répondre à l'incompréhension du concept de résilience ;***
- ***L'approche collaborative pointe du doigt les limites préexistantes de la gestion cloisonnée des risques ;***
- ***Concevoir main dans la main une stratégie de résilience favorise l'acceptation et l'intégration du concept dans les pratiques locales de gestion des risques.***

Quelques limites sont pourtant à observer :

- ***Les méthodologies collaboratives n'aident pas nécessairement à conduire à une mesure de la résilience ;***
- ***Lorsque c'est le cas, c'est essentiellement la résilience des infrastructures critiques qui est analysée.***

5. Bilan des outils, modèles et méthodologies d'opérationnalisation de la résilience urbaine

La multitude de modèles existants afin d'opérationnaliser la résilience dénote de l'importance croissante du concept.

Ces modèles, aussi divers et variés soient-ils, sont essentiels à la transcription du concept en un concept-outil (Gonzva, 2017). Dépassant la polémique sur la définition exacte du concept, ces modèles proposent d'opérationnaliser la résilience. L'exactitude de leur méthodologie passe alors au second plan car « *ce qui importe alors, ce n'est pas que le modèle soit rigoureux, mais qu'il soit opératoire* » (Tisseron, 2015). Cependant tous n'ont pas le même objectif ni la même visée (Figure 70).

Catégories	Approches	Exemples de modèles														
		Leaken Indicators (1)	SoVI (2)	SVI (3)	PhyVI (4)	Quantifying social vulnerability (5)	BRIC (6)	DS3 Model (7)	Resilience Capacity Index (8)	PEOPLES (9)	VisAdapt (10)	DOMINO (11)	ViewExposed (12)	Toubin (13)	100RC (14)	Observatories (15)
Indicateurs	Spécifique	V						V								
	Globale		V	V	V	V	V		V	V						
Systèmes spatiaux d'aide à la décision	Spécifique											V				
	Globale										V		V			
Approches collaboratives	Spécifique											V		V		
	Globale														V	V

(1) Leaken Indicateurs (Jean et al., 2019)
(2) SoVI (Cutter et al., 2003)
(3) SVI (Flanagan et al., 2011)
(4) PhyVI (Rød et al., 2012)
(5) Quantifying Social Vulnerability (Dwyer et al., 2004)
(6) BRIC (Cutter et al., 2014)
(7) DS3 Model (Serre, 2018)
(8) Resilience Capacity Index (Foster, 2012)
(9) The PEOPLES framework (Renschler et al., 2010)
(10) VisAdapt (Johansson et al., 2016)
(11) DOMINO (Robert et al., 2017)
(12) ViewExposed (Opach and Rød, 2013)
(13) Améliorer la résilience urbaine par un diagnostic collaboratif (Toubin, 2014)
(14) City Resilient Framework (100 Resilient Cities, n.d.)
(15) Citizen Observatories (Wehn et al., 2015)

Figure 70 : Catégorisation des différents modèles présentés

Tout d'abord, la majorité d'entre elles sont tournées autour d'une approche dite technico-fonctionnelle (Balsells et al., 2013; Lhomme et al., 2010; Serre, 2015, 2018; Toubin, 2014; Johansson et al., 2016). L'approche est tournée autour de la résilience des réseaux, des infrastructures critiques, du bâti mais très peu abordent de façon globale et systémique le concept.

Lorsque certaines le font (100 Resilient Cities, s. d.; Cutter et al., 2014, 2010; Opach and Rød, 2013; Suárez et al., 2016), l'échelle d'action n'est pas toujours adéquate. Prenons par exemple les travaux de Cutter. L'échelle étatique est certes un bon indicateur des aires géographiques plus ou moins résilientes en fonction d'indicateurs précis, mais les gestionnaires des villes, maires, urbanistes, architectes ou simples citoyens ne peuvent que très difficilement

prendre des décisions pour améliorer la résilience locale. Or les prises de décision se font bien souvent à l'échelle de la municipalité et/ou encore plus finement à l'échelle du quartier. Ce travail tend plus à un partage de connaissance qu'à une aide à la décision.

Ces modèles ne sont donc pas exhaustifs ni exclusifs et il est nécessaire de les utiliser conjointement ou à différents moments et phases d'une construction de stratégie de résilience. Pourtant, cette multitude ne favorise pas la compréhension et l'appropriation d'un concept encore abstrait pour beaucoup d'acteurs et gestionnaires locaux. Un outil permettant de définir, mesurer, clarifier et aider à la prise de décision serait donc d'un intérêt non négligeable.

L'enjeu ici est donc de concilier une approche globale de la résilience à une échelle suffisamment fine pour entraîner une appropriation des concepts par les gestionnaires et acteurs locaux, appropriation qui devrait découler sur une prise de décision. De ce fait, l'opérationnalisation de la résilience devrait être plus effective et durable dans le temps et l'espace.

⇒ ***Nous nous proposons donc de répondre à ce double enjeu : étudier la résilience de manière la plus globale possible à une échelle qui permettrait l'aide à la décision.***

Ces études restent néanmoins des exemples cruciaux de l'avancée scientifique et technique des travaux sur la résilience, exemples qui serviront de piliers à notre travail.

> ***Si la résilience est un concept favorisant l'innovation, l'apprentissage, en mettant en avant des capacités de rebond, de relance, de flexibilité et d'adaptation, le concept reste encore complexe à opérationnaliser pour les acteurs locaux. Certaines recherches ont tenté de répondre aux biais opérationnels, mais très peu parviennent à analyser la résilience urbaine à une échelle locale et via une approche exhaustive, c'est-à-dire en analysant toute la complexité du territoire, à travers toutes les composantes qui font l'espace urbain. Cette recherche cherche donc à aborder la résilience de façon globale et à une échelle locale afin de favoriser l'aide à la décision.***

Partie 2

Positionnement scientifique et méthodologique

A partir de l'analyse du contexte et de l'état de l'art, il est désormais possible d'affiner notre positionnement scientifique et notre démarche méthodologique.

1. Positionnement scientifique et opérationnel

1.1. Positionnement théorique

Afin d'analyser un concept aussi complexe, fluctuant et abstrait que la résilience, il est nécessaire d'établir ce que l'on entend par ce terme et quels sont les choix nécessaires dans l'étude. Après avoir exposé dans les parties précédentes les diverses interprétations possibles de la résilience urbaine, nous définissons quant à nous la résilience comme :

⇒ ***Les aptitudes et capacités d'une ville et de sa population à mettre en place avant, pendant et après un événement perturbateur (ici une inondation) de façon à en limiter les impacts négatifs.***

Ce positionnement scientifique permet d'analyser la résilience avant, pendant et après une catastrophe et permet de l'aborder sur un long pas de temps (Figure 71), mettant en avant des capacités proactives que le système urbain doit développer de façon à (ré) agir face à la catastrophe, développant par la même des aptitudes d'apprentissage et d'anticipation (Dauphiné and Provitolo, 2007). La résilience n'est donc plus une aptitude observable uniquement après la crise, mais un concept qui définirait plutôt un processus d'apprentissage (Brand and Jax, 2007; Davidson-Hunt and Berkes, 2002; Gunderson and Holling, 2002) via une culture du risque (Laganier, 2015), sur le temps long, au cours duquel le choc ne serait plus qu'un élément déclencheur et révélateur des capacités intrinsèques du système. De ce point de vue, la résilience et la vulnérabilité ne sont plus en opposition mais participent à la définition des caractéristiques inhérentes au systèmes. Le choc permettra alors de mettre en avant ces résiliences et/ou ces vulnérabilités.

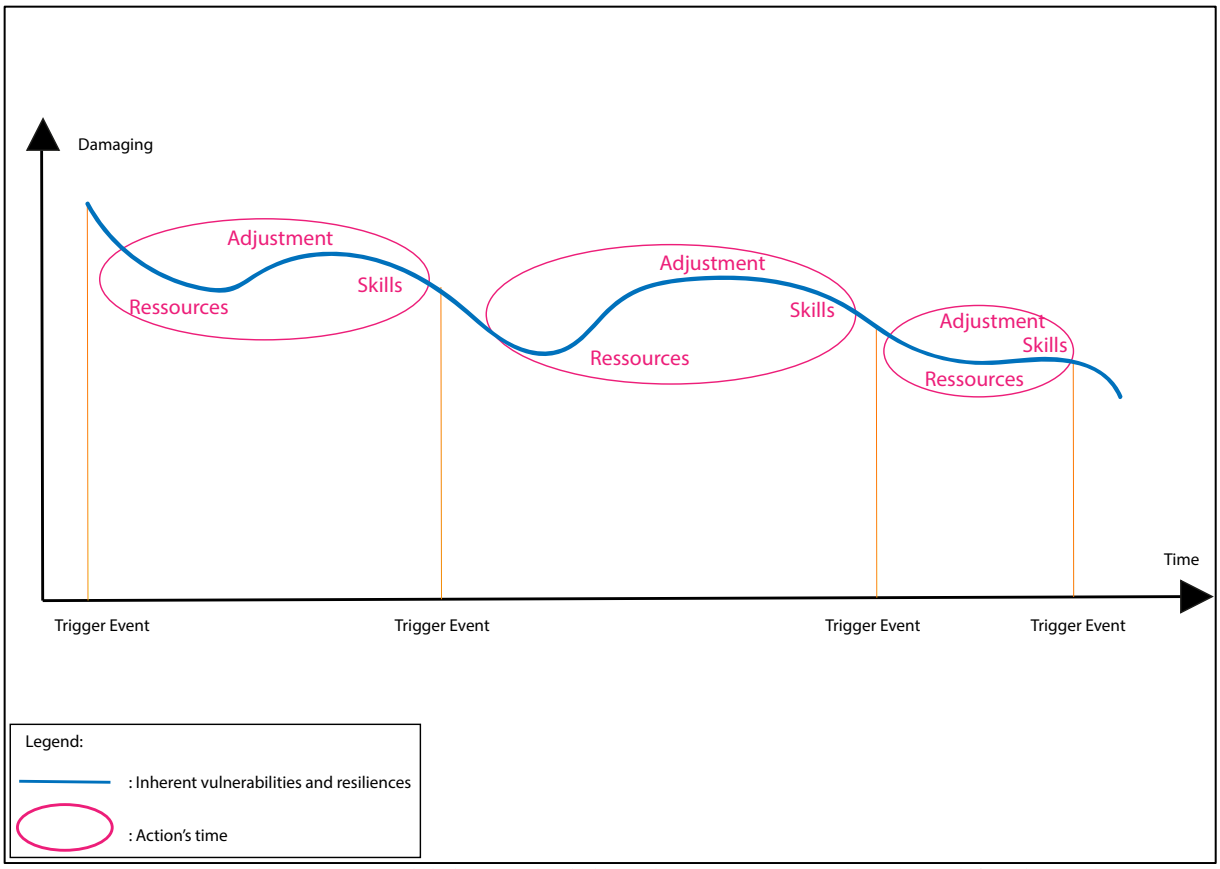

Figure 71 : Schéma conceptuel de l'approche de la résilience sur un temps long (Heinzlef et al., 2019)

Cette analyse considère également que la résilience est intrinsèque à l'environnement urbain et humain, que le choc n'est dès lors plus obligatoirement négatif, ni même nécessaire, pour développer des capacités de résilience. Dès lors, ces capacités peuvent être des aptitudes préexistantes à la crise.

Néanmoins, cette caractéristique peut être révélée par le choc. Les facteurs de résilience peuvent alors être identifiés a-chroniquement, sur un temps long (Serre, 2011) de façon à étudier et développer des potentiels de résilience (Reghezza-Zitt et al., 2012; Serre and Heinzlef, 2018). La résilience fait toujours référence à un retour vers un équilibre acceptable, qu'il soit préexistant au choc ou nouveau. Ce concept fait donc appel à des innovations dans les domaines techniques, urbains, sociaux, architecturaux, économiques, politiques, permettant de questionner une gestion classique des risques parfois obsolète. Cette injonction à l'innovation s'adapte parfaitement à la complexité urbaine, économique, politique, sociale et écologique du monde moderne (Serre and Heinzlef, 2018).

> ***Dans cette recherche, la résilience urbaine englobe les aptitudes et capacités d'une ville et de sa population à mettre en place avant, pendant et après un événement perturbateur de façon à en limiter les impacts négatifs. La résilience est étudiée suivant un temps long, un continuum, afin d'analyser les capabilités intrinsèques du territoire.***

1.2. La collaboration avec la Ville d'Avignon, un atout clef pour opérationnaliser la résilience urbaine

Comme nous l'avons abordé, une approche collaborative est une des garanties de la compréhension et de l'appropriation du concept de résilience. Il était nécessaire de choisir un territoire qui soit à la fois concerné par le risque inondation, mais aussi impliqué et préoccupé par les stratégies de gestion des risques et de résilience. Ces éléments étaient des conditions *sine qua non* pour élaborer un outil d'aide à la décision afin d'intégrer le concept de résilience dans les stratégies de gestion des risques.

En France, le risque d'inondation est le plus fréquent et le plus dommageable (Vinet, 2010) de tous les risques. Environ 17 millions de personnes (26% de la population française) et 9 millions d'emplois sont situés dans des zones inondables (Larrue et al., 2016). Actuellement, *l'International Disaster Data Base* classe la France au deuxième rang des pays européens les plus exposés à des événements naturels très graves. Les dommages devraient augmenter en raison de l'exposition croissante des populations et des biens (Bouwer et al., 2010). La région méditerranéenne se réchauffe plus vite que la majeure partie du reste du monde : par rapport à l'augmentation moyenne mondiale de 1°C depuis l'époque préindustrielle, la température moyenne a déjà augmenté de 1,4°C. Et si, hypothétiquement, l'objectif de maintenir l'augmentation moyenne de la température mondiale à +1,5°C était atteint, la zone méditerranéenne serait encore plus chaude de +2,2°C en moyenne (Cramer et al., 2018). Par ailleurs, un rapport du ministère français de l'Environnement estime qu'il y a en moyenne 10 décès par an dans les 12 départements du littoral méditerranéen dus à des inondations spécifiques. Le taux de sinistralité est donc principalement concentré dans le sud-est de la France, et en particulier dans le Gard et le Vaucluse. En région Provence-Alpes-Côte d'Azur (Figure 72), les inondations représentent 63% des arrêtés Catnat (CATastrophes NATurelles-(Observatoires régional des risques en PACA, 2017).

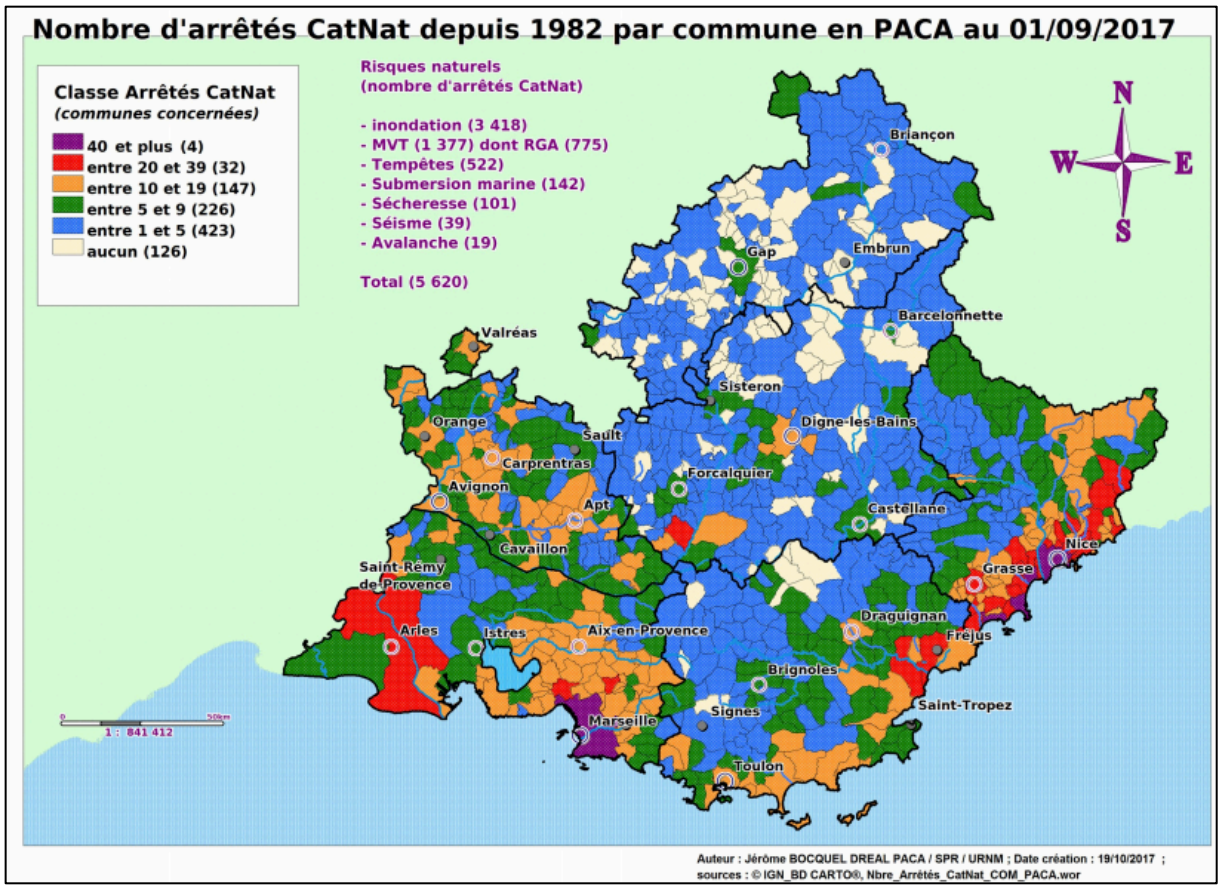

Figure 72 : Nombre d'arrêtés CatNat en Région PACA (Observatoires régional des risques en PACA, 2017)

Par ailleurs, sur la base de la proportion de la population estimée vivant dans les zones inondables, le Vaucluse, avec 42 % (Observatoire des territoires, 2015), est l'un des départements français les plus exposés, toutes ses communes étant touchées par les risques d'inondation. Par exemple, en juin 2010, des tempêtes ont frappé le sud-est de la France et les fortes pluies ont provoqué de violentes inondations. Les précipitations ont été exceptionnelles pour la période de l'année ; 400 mm de pluie sont tombés en moins de deux jours en Provence, une quantité qui n'avait pas été observée au cours des 50 dernières années. Des centaines de maisons ont été inondées dans le département du Var, faisant plusieurs morts (Met Office, 2011).

Avignon, chef-lieu du Vaucluse, est confronté à des tensions hydriques (confluence du Rhône et de la Durance) et humaines (Gentric et Langumier, 2009). Selon l'évaluation des Territoires à Risques importants d'Inondation (TRI), qui correspondent à la déclinaison juridique de la Directive cadre Inondation :

- la population permanente dans les zones sujettes aux inondations est d'environ 400 000 personnes, soit 67 % de la population totale estimée du TRI ;
- environ 185 000 emplois sont basés dans des zones inondables, soit 76,2 % du total des emplois identifiés dans le TRI (Directive Inondations Bassin Rhône-Méditerranée, 2014).

En 2010, on estimait qu'à Avignon, 768 habitants et un maximum de 606 emplois seraient touchés en cas d'inondations fréquentes (Figure 73) et 73 820 habitants pour un maximum de 72 198 emplois en cas de scénario extrême (Figure 74).

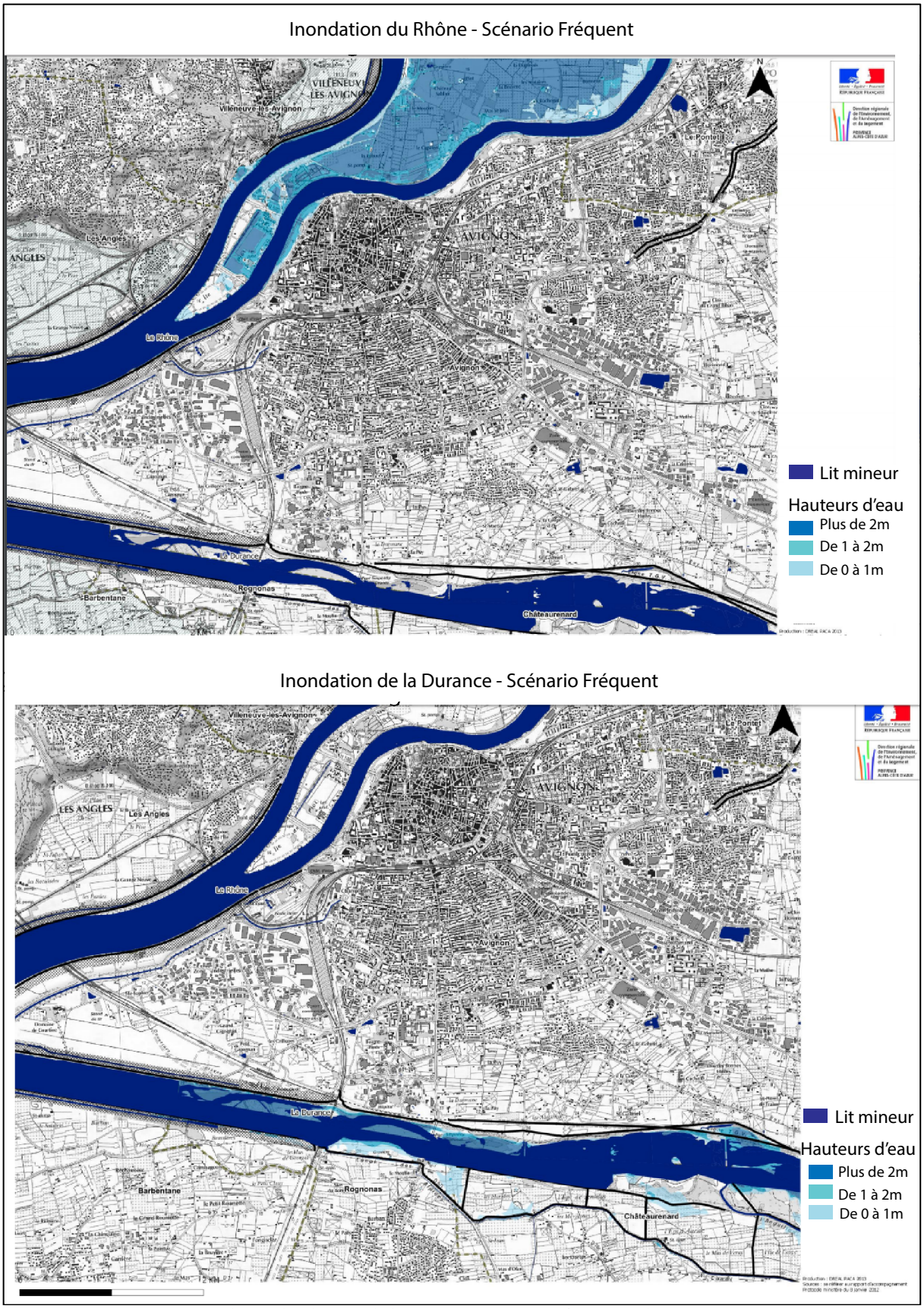

Figure 73 : Inondation du Rhône et de la Durance - Scénarios fréquents, d'après ©DREAL PACA

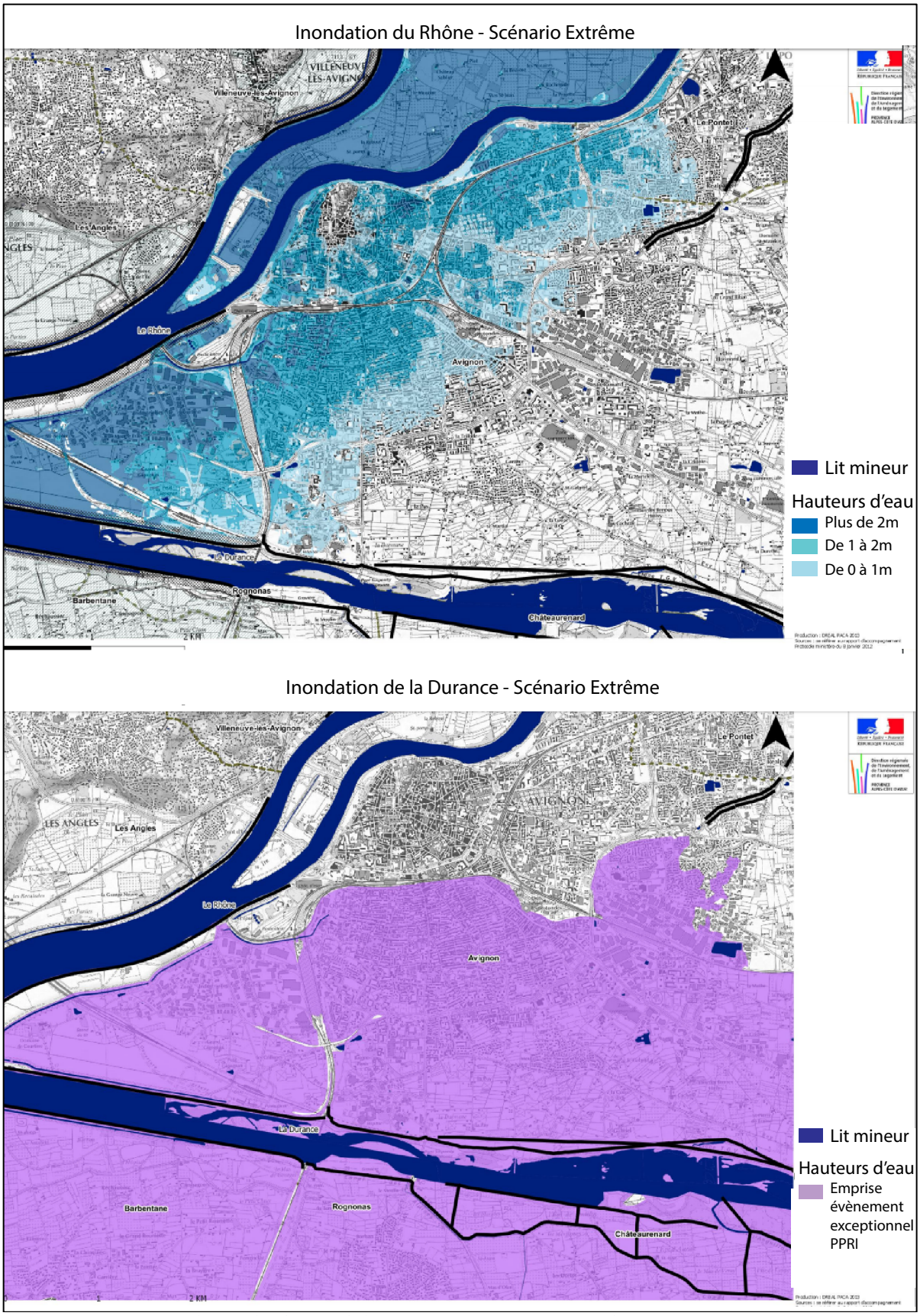

Figure 74 : Inondations du Rhône et de la Durance, Scénarios extrêmes, d'après ©DREAL PACA

Avec des inondations importantes, mais rares (l'inondation la plus marquante ayant eu lieu récemment date de 2003), la culture du risque, la stratégie de prévention et l'opérationnalisation de la résilience d'Avignon sont remises en question.

Il est donc crucial pour la collectivité d'Avignon de disposer d'un système d'aide à la décision pour intégrer le concept de résilience dans les stratégies urbaines. Bien que la ville dispose déjà d'outils de communication et de protection (DICRIM, PPRI), le concept de résilience est, comme nous l'avons déjà mentionné, à peine intégré dans les pratiques. L'objectif principal de ce projet était donc de pallier aux biais théoriques et pratiques de l'opérationnalisation de la résilience par la co-construction d'un système d'aide à la décision. En effet, la région PACA souffre chaque année d'événements liés aux débordements fluviaux. Chaque événement pose la question de la stratégie territoriale face à des événements qui sont (ou seront) de plus en plus intenses et récurrents selon les prévisions du GIEC. Cependant, les élus locaux, les gestionnaires et les décideurs sont parfois impuissants face aux impératifs des territoires à développer des stratégies de résilience tant à court qu'à long terme. En même temps, les opérations de développement urbain se poursuivent dans les zones à haut risque, mais sans nécessairement développer de stratégies de gestion. Compte tenu du contexte régional lié aux risques d'inondation et aux questions foncières, il est important que les décideurs locaux et les professionnels de la planification puissent intégrer des stratégies de résilience dans leurs perspectives territoriales. L'outil développé dans cette recherche vise donc à répondre aux enjeux de l'opérationnalisation de la résilience urbaine afin d'inclure le concept dans les stratégies de gestion du risque inondation.

Le partenariat socio-économique développé avec la Ville d'Avignon et son Service SIG a permis l'échange des données nécessaires à l'étude du territoire et l'appui quotidien au développement, à l'intégration et au traitement des données géographiques. L'intérêt de la Ville pour ces travaux s'explique par la vulnérabilité du territoire avignonnais face aux inondations. La vie de la communauté et les développements urbains sont totalement conditionnés par cet environnement critique. Pouvoir concevoir des outils d'aide à la décision pour intégrer la résilience urbaine présente plusieurs avantages tels que la connaissance spécifique du territoire et la participation à la préparation et à l'anticipation de la ville de demain.

2. Démarche méthodologique

Notre objectif pour opérationnaliser la résilience a été de déterminer puis de mesurer des caractéristiques de résilience sur le territoire avignonnais. Pour cela, il a été nécessaire de définir des indicateurs de résilience afin de comprendre ce qui pouvait augmenter ou diminuer cette capacité de résilience. C'est dans cette optique que nous avons cherché à construire un système spatial d'aide à la décision collaboratif pour l'opérationnalisation de la résilience.

2.1. Construire des indicateurs pour évaluer la résilience urbaine

Comme exposé précédemment, l'utilisation des indicateurs s'est propagée dans le domaine des risques et dans la mesure de la vulnérabilité et de la résilience des territoires et des populations face aux risques. S'il fallait défendre la nécessité et l'intérêt de construire des indicateurs de résilience, l'un des premiers arguments serait qu'en définissant et en caractérisant un concept abstrait, ils permettent de sensibiliser la communauté scientifique, tout comme le grand public, à des sujets complexes (Prior and Hagmann, 2014). Par ailleurs, les indicateurs de résilience peuvent fortement contribuer à l'évaluation des besoins et objectifs d'une collectivité tout en l'accompagnant dans la création de stratégies de résilience (Cutter, 2016). Ces indicateurs, utiles lors de la conception d'une stratégie, sont également appréciables pour suivre les avancées de travaux, de prises de décisions, de progrès faits par une collectivité.

Afin de mesurer la résilience, trois indicateurs de résilience ont été co-conçus avec le Service SIG de la ville d'Avignon. L'objectif de ces indicateurs est d'aborder la résilience dans sa globalité afin d'évaluer toutes les composantes territoriales et sociales qui peuvent permettre de développer des capacités de résilience. L'idée est donc d'évaluer la résilience sur le long terme grâce à ces indicateurs.

2.2. Opérationnaliser la résilience via les techniques de géovisualisation

De nouvelles méthodes telles que la géovisualisation offrent aujourd'hui la possibilité de travailler, exploiter, souligner et illustrer des données abstraites et hétérogènes. La géovisualisation est parfaitement adaptée à la représentation et à l'analyse de données géoréférencées (Saint-Marc, 2017). Cette représentation des données - aussi appelée " science virtuelle " - permet de construire, reconstruire, représenter et interpréter des questions scientifiques (Yasobant et al., 2015). Le fait de représenter les données spatio-temporelles sous différentes formes permet de mieux comprendre les différents phénomènes en jeu, d'où une meilleure diffusion de l'information ou une meilleure prise de décision. Cette méthodologie permet d'explorer des hypothèses, de partager des arguments, d'élaborer des solutions et, surtout, d'établir des connaissances communes sur le même sujet (Maceachren and Kraak, 1997). Il permet de clarifier des données et des sujets complexes grâce à l'analyse visuelle (Donolo, 2014) pour aider et encourager les gens à découvrir des questions, des tendances et des modèles complexes. Par conséquent, la méthodologie de la géovisualisation améliore la

connaissance territoriale et conduit à des outils tels que les systèmes spatiaux d'aide à la décision.

Ce choix méthodologique nous a poussé à mettre l'accent sur les avantages de la visualisation. Nous avons cherché à clarifier l'approche et l'analyse de la résilience. Pour se faire, l'accessibilité et la compréhension des traitements mais aussi des résultats nous a semblé essentiel. Nous avons donc fait le choix d'utiliser des outils de traitements valorisant la visualisation tout en mettant l'accent sur *l'open data* et des outils en *open access* afin de permettre un accès plus aisé aux résultats. En outre, un travail sur la valorisation des travaux via la création d'une page web et d'ateliers avec différentes équipes spécialisées sur la résilience ainsi que les gestionnaires urbains ont été effectués afin de tester, valider et mettre en perspective les résultats.

2.3. Opérationnaliser la résilience via une méthodologie collaborative

La démarche développée a mis l'accent sur la collaboration entre experts scientifiques et acteurs locaux. Construire une démarche commune a permis de clarifier le concept de résilience et le traduire en stratégie de gestion des risques. Cette collaboration s'est effectuée avec le service SIG de la ville d'Avignon.

La collaboration s'est cristallisée à plusieurs étapes de la recherche. Après une nouvelle analyse du concept de résilience via une étude de la littérature scientifique, une confrontation entre le positionnement scientifique et les connaissances des acteurs locaux a eu lieu. Il a notamment été nécessaire de réévaluer les indicateurs envisagés en fonction des données utilisées par le service SIG. Après avoir établi le modèle conceptuel de résilience avec les indicateurs, le choix des outils de traitements s'est porté sur ceux utilisés et connus par les acteurs. Chaque traitement et analyse de données a été effectué à une fréquence régulière avec le service SIG.

Au fur et à mesure de la construction du système spatial d'aide à la décision, des réunions avec les gestionnaires des infrastructures critiques ont eu lieu afin de tester et valider les résultats. Ainsi, chaque étape était confrontée à la réalité des acteurs, à leur compréhension et leur future utilisation de l'outil.

Cette approche collaborative a permis de questionner l'opérationnalisation de la résilience et de proposer une démarche pour répondre à ces enjeux. Il est apparu nécessaire d'impliquer les connaissances, habitudes et pratiques locales (Vanderlinden et al., 2017) dans la construction de l'outil afin de s'assurer de son utilité et utilisation par la suite.

3. Synthèse

Cette recherche a pour objectif d'opérationnaliser la résilience sur un territoire soumis au risque inondation. Cette opérationnalisation se construit autour de la construction d'un système spatial d'aide à la décision (Figure 75). Afin de pallier aux biais du concept, la méthodologie s'est appuyée sur une démarche collaborative afin d'associer les gestionnaires urbains dans la construction de ce système d'aide à la décision. La collaboration a permis d'établir trois indicateur de mesure de résilience. En outre, afin de s'assurer de la compréhension, de la facilité d'utilisation et de l'adoption de la méthodologie, un choix a été fait d'utiliser les techniques de la géovisualisation (visualisation aisée des traitements et accessibilité des résultats). Les résultats exposés dans la partie suivante mettent en lumière les enjeux de l'adoption de stratégies de résilience, l'intérêt d'une approche exhaustive et collaborative, l'importance d'une attention portée sur la géovisualisation, ainsi que la nécessité d'impliquer les gestionnaires urbains afin d'adapter les résultats cartographiques.

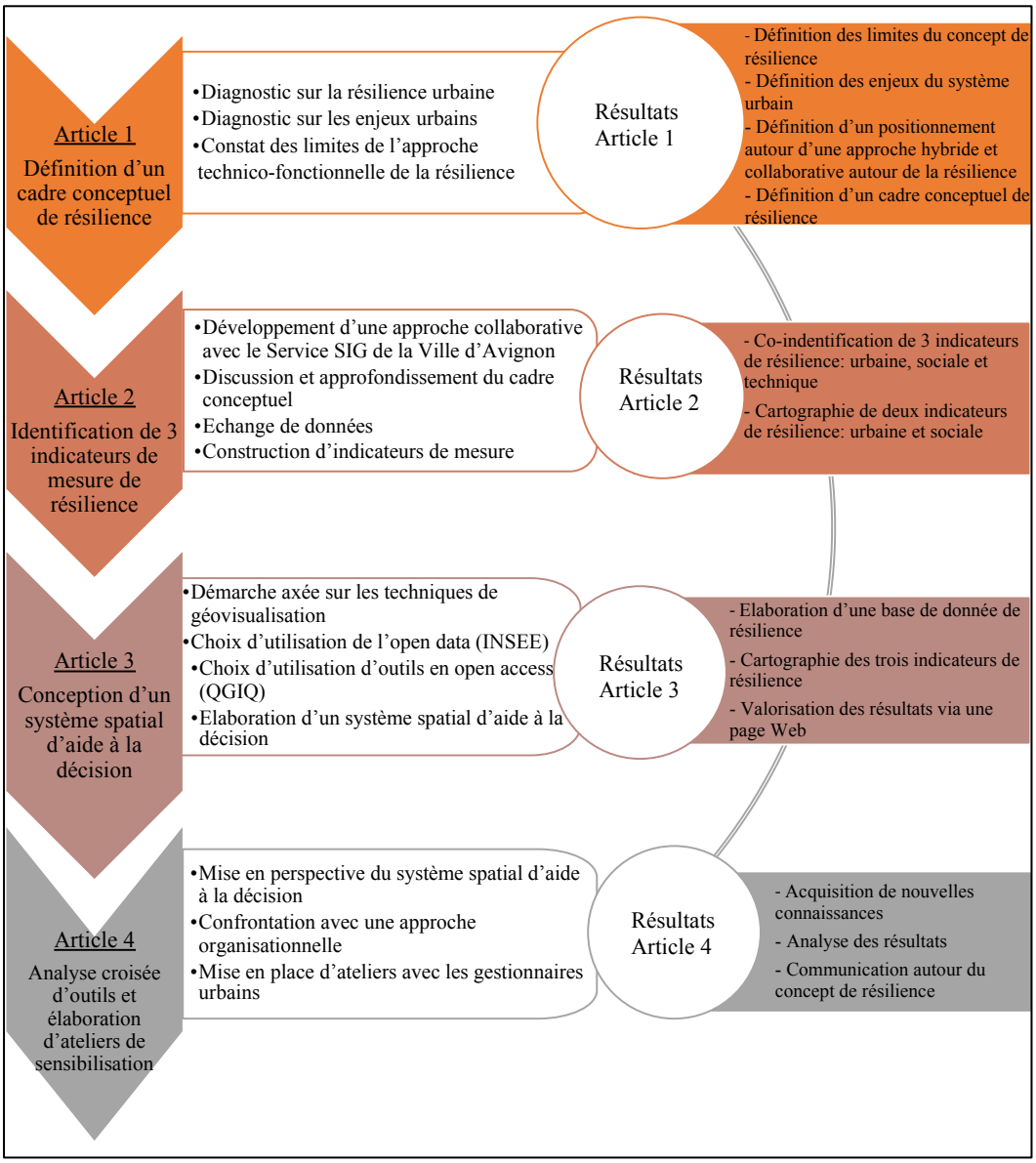

Figure 75 : Démarche méthodologique développée dans la thèse

Partie 3

Résultats

Conception d'un système spatial d'aide à la décision pour opérationnaliser la résilience urbaine

Pour répondre aux enjeux et limites soulevés liés à l'opérationnalisation de la résilience urbaine face au risque d'inondation, un système spatial d'aide à la décison est proposé. Ce système, composé d'indicateurs de mesure, est un outil essentiel pour définir et mesurer la résilience d'un territoire. Cet outil, co-construit avec le Service SIG de la ville d'Avignon, s'est appuyé sur une méthodologie qui a mis l'accent sur les pratiques de modélisation de la résilience, de géovisualisation et de collaboration.

Cette partie se divise en quatre articles. Chaque article est précédé d'une contextualisation et d'une analyse des apports et des limites des résultats obtenus :

- L'article 1 souligne le positionnement de cette recherche parmi les avancées sur la résilience et les tentatives d'opérationnaliser ce concept.

- L'article 2 aborde l'apport de la modélisation du concept de résilience grâce au développement de trois indicateurs de mesure de résilience

- L'article 3 met l'accent sur les pratiques de géovisualisation qui ont permis de clarifier la résilience, à la fois dans les outils et données utilisés que dans la valorisation visuelle des résultats.

- Cette partie se termine sur les perspectives d'amélioration d'ores et déjà amorcées avec la construction d'ateliers (article 4) afin de discuter et améliorer les indicateurs et résultats obtenus. Cette dernière étape s'est construite en collaboration avec une équipe de l'Université de Polytechnique de Montréal afin de confronter deux approches différentes de résilience, l'approche organisationnelle (Canada) et l'approche mêlant composantes techniques, urbaines et sociales, construite et testée à Avignon.

1. « Assessing and mapping urban resilience to floods with respect to cascading effects through critical infrastructure networks »

Statut de l'article n°1 : Publié dans *International Journal of Disaster Risk Reduction* en Septembre 2018

◊ Serre, D., et Heinzlef C. « Assessing and Mapping Urban Resilience to Floods with Respect to Cascading Effects through Critical Infrastructure Networks ». *International Journal of Disaster Risk Reduction* 30 (2018): 235-43. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.02.018.

1.1. La résilience pour répondre aux enjeux des effets dominos : contexte

L'environnement urbain est extrêmement fragilisé par les défaillances potentielles des réseaux techniques urbains en cas d'inondation majeure (Robert et al., 2017). Ces réseaux techniques sont considérés comme des infrastructures critiques (Lhomme et al., 2010). Leurs ruptures peuvent produire des réactions en chaîne, aussi appelées « effets domino ». Or, du fait de la complexité croissante des aires urbaines et des incertitudes liées à l'absence de données ou de modèles pour simuler le changement climatique, l'augmentation des catastrophes et de la population urbaine, il est de plus en plus difficile de prévoir les effets de ces défaillances sur l'environnement urbain. Les infrastructures critiques sont à la fois essentielles au bon fonctionnement des interactions sociales et spatiales, mais aussi extrêmement vulnérables au changement climatique et à l'apparition de nouveaux risques. Après avoir exposé l'importance des infrastructures critiques dans les espaces urbains, cet article présente plusieurs stratégies d'opérationnalisation de la résilience. L'objectif est de présenter de nouvelles méthodes pour construire un outil spatial d'aide à la décision afin de (re)définir et évaluer les différents niveaux de résilience au regard du risque inondation. L'inondation se diffuse au-delà des limites géographiques et administratives des aires urbaines à causes des réseaux : ces réseaux fonctionnent en propagateur spatial du risque. Les conclusions de cet article mettent en lumière la nécessité d'innover autour des stratégies de résilience. Pour cela, la co-construction de systèmes d'aide à la décision est essentielle pour créer un pont entre avancées scientifiques et connaissances et expertises locales.

Rôle	Auteurs
Conceptualisation	Damien Serre / Charlotte Heinzlef
Méthodologie	Damien Serre/ Charlotte Heinzlef
Investigation	Charlotte Heinzlef
Ecriture	Charlotte Heinzlef
Supervision	Damien Serre
Administration du projet	Damien Serre

International Journal of Disaster Risk Reduction xxx (xxxx) xxx–xxx

Contents lists available at ScienceDirect

International Journal of Disaster Risk Reduction

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ijdrr

Assessing and mapping urban resilience to floods with respect to cascading effects through critical infrastructure networks

Damien Serre[a,*], Charlotte Heinzlef[a,b]

[a] UMR 7300 ESPACE - University of Avignon, 74 rue Louis Pasteur - Case 19, 84029 Avignon Cedex 1, France
[b] Faculty of Architecture and Urbanism, Rue d'Havré 88, 7000 Mons, Belgium

ARTICLE INFO

Keywords:
Urban flooding
Critical infrastructure networks
Cascading effects
Resilience strategies
Climate change

ABSTRACT

The urban environment is very concerned by network failures. These failures are propagating risks in area generally considered as non-vulnerable. There are various causes of possible disruptions in critical infrastructure networks (CIs), such as natural hazards, technological hazards, accidents, human errors and terrorism. However, in the last years it became harder to identify the possible failures of complex networks and to forecast their effects on the urban environment. New challenges such as climate change and the ageing of CIs are likely to increase the difficulty to secure the lifelines, raising the potential of damages and economic losses caused by failures. This paper suggests some new methods to assess and map resilience levels to floods taking into account critical infrastructure networks as risk propagators at different spatial scales. The conclusions support the development of innovative strategies and decision support systems for new resilient urban environments.

1. Introduction: Human-made disasters and cascading effects

In a global changing – and warming – context, natural disasters have increased of about 2% a year in the world over the past 15 years [7]. Summer 2017 is a representative example of the accumulation of natural disasters in a very short period of time. Mid-August 2017, Hurricane Harvey reached Caribbean and Texas. This category 4 hurricane (out of 5) caused more than 80 deaths and heavy economic losses in this oil region, with many days of torrential rains. The Gulf of Mexico did not really have time to recover: Irma breaks after Harvey, with winds of more than 290 km/h. This category 5 hurricane almost completely destroyed the French islands of Saint-Martin and Saint-Barthélemy. The damage costs were estimated at 1.2 billion euros by the *Caisse centrale de réassurance* (CCR) [6]. Mid-September, Hurricane Maria reached Dominica, eastern Caribbean (two weeks after Hurricane Irma), northeast of the Bahamas and Puerto Rico. It caused a hundred deaths and the damage costs are estimated between 15,9 and 95 billion dollars. This accumulation of disasters in a very short time period highlights a global climate deregulation [23]. If those examples remain extremes, we observe an increase in the "daily disasters".

Among these disasters, the risk of flooding causes the most destructions [46]. Indeed, since 1960, the number of floods has increased considerably, reaching more than 600 events for the year 2007 [48]. For example, in 2013, we observed that flood damages were approximately 50% higher than in the period 2003–2012 [33]. Although the number of deaths has decreased in the face of this risk, floods are still the costliest natural catastrophe, with a total volume of 100 billion €/year by the end of the century.

At the same time, the increasing complexity of cities makes flood risk management difficult. Over the last ten years, half of the world's population has become urban. Human concentration (50% of individuals living in urban areas [48], and urban population makes flood risk management very difficult in such areas. Urbanization of urban areas has increased from 10% in the 1990s to 50% in just two decades [24]. This very rapid process has weakened the territory because cities are not prepared or equipped to manage the needs of such a concentration of population, especially when a risky situation appears. This, due to a lack of available land, comes to settle in the risk zones. These spaces left free are gradually nibbled by urbanization without respecting the natural functioning of catchments, rivers… leading to impervious soils, preventing the necessary infiltration of rainwater. Also, the increase of man-made disasters - an increase in frequency and intensity - makes these territories even more fragile and complex to manage. It is therefore established that, in urban areas, man-made risks tend to have extreme consequences [30] especially because issues are concentrated in vulnerable areas. Besides, these areas are increasing because of urban sprawl.

Among the urban equipment, some infrastructures are more essential than others, namely Critical Infrastructure (CI). It is a hard task to define what "critical" infrastructure exactly means. Etymologically,

* Corresponding author.
E-mail addresses: damien.serre@univ-avignon.fr (D. Serre), charlotte.heinzlef@univ-avignon.fr, charlotte.heinzlef@umons.ac.be (C. Heinzlef).

https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.02.018
Received 29 October 2017; Received in revised form 11 February 2018; Accepted 12 February 2018
2212-4209/ © 2018 Published by Elsevier Ltd.

Please cite this article as: Serre, d., International Journal of Disaster Risk Reduction (2018), https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.02.018

critical comes from ancient Greek *kritikos*, word linked to the vocabulary of crisis, derived from the verb *Krinein*, meaning "separate" or "decide" or "choose" [38]. These infrastructures concentrate all the functions [32] which are necessary for the functioning of a community. They are considered as "critical" because their potential destruction could weaken the whole defense and economic organization [16] of a country or a city. Critical Infrastructures can be natural; water supply, flood water storage; built, energy networks, telecommunication networks, emergency services, transport networks; or virtual, cyber information systems for instance [16,38]. Nevertheless, none exhaustive list exists to explain what is a critical infrastructure.

Cities are developing links between people, activities, properties, infrastructures and networks and create by this way a quality of life and dynamic activities. However, the density of urban creates new risks. The lack of available lands results to build new infrastructures in risk areas [38] and, moreover, this sprawl leads to an over-interconnection between technological networks and society. These links have increased the vulnerability of urban areas, building an interdependence [32] between all urban factors. The complexity of infrastructures and urban systems weakens the functioning of components in a time of crisis. Because of the interconnected system, if a shock happened, the system would crash more often since the dysfunctional phenomenon would be more important than the first affected area [38]. It appears that, the more a territory is connected, the more the impacted area will be important [22]. Because of the concentration of activities, networks and populations, the spread of risks is very quick and disrupts large-scale territories. The main difficulty is that experts cannot precisely predict the potential breakdown of infrastructure or its domino effects [33,5]. As we cannot predict these events, traditional crisis management is ineffective in case of infrastructure breakdown [5]. Prevention and planning management are not suitable in the way that these strategies do not take into account the dynamics of threat, and therefore the dynamics of interdependences [38]. But the very own definition of crisis and its consequences, is that its unpredictable, in permanent changes and evolutions. That's why, for more than ten years, experts have begun to question themselves about their risk management. In policy, economics, urban planning, architecture and scientific research the focus is now increasingly focusing on strategies to make urban systems simultaneously less vulnerable and more resilient to climate-related disasters, while addressing the long-term challenges of sustainability and quality of life [34]. The injunction of international authorities to find a new risk management (system) able to create a transition to a general culture of risk [14] led researchers and managers to look at other approaches to manage natural hazards. A new approach has thus been gradually integrated, based on the concept of urban resilience.

The goal of this article is to present new methods, in a way to better understand urban risk propagation through CIs breakdowns and to reduce vulnerability of network interdependencies increasing urban environments resilience. We will define in a first part what "cascading effects" and "risk propagation" exactly mean. In a second part, we will describe how we used the concept of resilience to design some methods and tools, thanks to a research-scientist collaboration and managers of the territory, to improve the resilience of urban environment to floods. Finally, we will present two possible applications in Hamburg (Germany) and Avignon (France).

2. Cascading effects and risk propagation

Globalization created a connected world, an imbroglio of policies, economies, procedures and expectations. These interactions between territories and societies are complex and create interdependencies [38]. However, these interdependencies create as much wealth and security as they weaken the territories and their populations in case of risks. As urban areas are interconnected, an infrastructure breakdown will impact territories beyond geographical and functional borders [5]. As they are connected and dependent on multiple levels, CI may impact much more than their first impact territory. The evolution of the impacted area can be caused by cascading effects, effects which increase the impacting area, generating secondary effects [32]. For example, urban networks can increase the risk, propagating water into large areas. Major floods can impact a specific area but as networks are interconnected, the risk will reach other territories which should not be flooded [22];. Besides, some crisis consequences are not caused by physical and direct damages but by the interruption of activities. Failure of electricity system can damage perishable goods, road deterioration can prevent relief from reaching an area, aggravating the danger of the populations, and complicate first responder operations.

Urban networks failure is a good example to understand and measure what a breakdown of CI can be. Urban networks are an essential part of the urban system. In an interconnected world, urban networks connect more and more people and territories, offering an important variety of resources and opportunities but also creating complex situations of interdependence. Public transport, electricity networks, gas, telephone, heating, waste, etc., make the urban system management more complex and delicate [38]. If they are essential to create dynamics, relationships, economies, these networks are also extremely vulnerable. Because of their interconnectivity, all urban operations depend on them. A single failure can have cascading effects and impact the entire network and, because of (a) reticular urban system, the entire city.

Consequences of Hurricane Sandy in New York City are a good example of these extreme vulnerabilities aggravated by CI breakdowns. Hurricane Sandy, one of the largest hurricanes ever recorded in the Atlantic [26], emerged off the west coast of Africa on October 11, 2012 and moved over the Gulf Stream. Sandy created a storm surge with highest values in New York City and its harbor, causing the destruction of part of the electricity grid: destroyed air lines, flooding of the buried network, etc. Flood impacts included flooding of subways (Fig. 1; the Long Island Rail Road remained closed until November), road tunnels, and the three major airports.

The New York University Langone Medical Centre was evacuated after the breakdown of generators due to flooding, causing the transfer of 200 patients. The destruction of power networks left 21,3 million people without electricity and the failure of electrical system caused fires which destroyed 111 houses and damaged 20 others [20]. Daily life was severely disrupted, with the interruption of the metro, the breakdown of the heating network, security systems, telecommunication services. In addition, alternative solutions such as emergency power generators have not been able to operate, refineries being in short supply and unable to provide the necessary fuel. If direct damages were estimated at 32,8 billion of repairs and restoration, indirect losses have cost much more for city and citizens. Due to interrelated networks and activities, indirect losses are caused by disruption of CI, such as

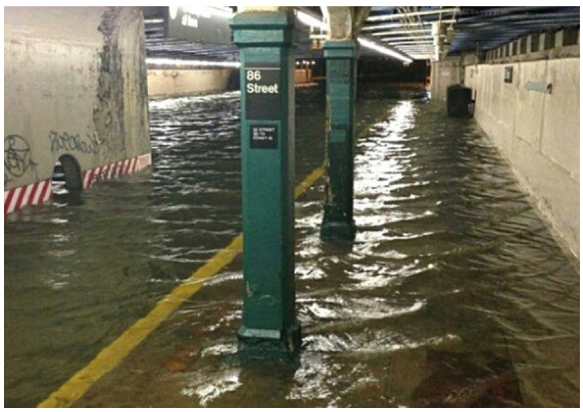

Fig. 1. Port Jefferson, NY.
Source: Newsday

economic losses due to an interruption of economic structures [20]. The balance-sheet of the management of hurricane Sandy is quite bad. The unprepared managers and citizens increased the crisis impacts. For example, the late evacuation order and misinformation resulted in the impossibility of evacuating some institutions. In addition, the crisis highlighted the vulnerability of sewage systems, the poor anticipation of network failures, the lack of a plan B for accessing to generators and relay antennas, and the installation of resistant flood-barriers [21]. In this case, the over-connected territory and society created new risks and made the crisis and post-crisis management harder and more complex.

CI breakdowns also have consequences, even before the event itself. Fearing the recurrence of the hundred-year flood, Paris (City) dedicated 5–9 billion to networks' damages on the 17 € billions of damages expected. The RATP expects that 200 km of tunnels would be flooded and unavailable for years. The supply of water networks would be reduced by 30%, three incineration plants will be closed (while waste generation would be equivalent to three years of production), 320,000 people will not have gas anymore, 48 bridges will be impracticable and 4 highways will be closed. Consequences of this kind of flood will be terrible for the local economy; 3964 commercial locals will be directly impacted and 40% companies located in a food zone will be submerged by 1 m height. Furthermore, the historical patrimony will be impacted, with 3 libraries flooded (François Mitterand library, Institute library and Mazarine library), several museums (Louvre Museum, Orsay Museum, Museum of Natural History and its menagerie, School of Beaux-Arts, etc.). Besides, all the archives (Prefecture, gendarmeries, insurances, etc.) are underground and could be impacted by a flood. All these buildings are classified and contain historical and artistic treasures and their destruction will be an immeasurable and incalculable loss for present times and future generations.

These case studies highlight the problematic of an urban flood and its cascading effects on territory and society. Given the strong interactions that exist between the different networks and the degree of dependence of public services, the least disturbance can spread both from one type of network to another but also, geographically, outside the only flooded area. It is a potential aggravation of the situation for the concerned territory. It is therefore essential to minimize the additional problems that flooding of networks may entail. Because of their interdependencies and vulnerability, territories must be prepared to important crisis and breakdowns of critical infrastructures, especially because these cascading effects are more and more common and expected [29]. But how can we face to theses breakdowns which will lead to cascading effects? These effects are terrible and unpredictable. By definition a crisis is a sudden event, which is neither foreseen nor thought or imagined. We cannot precisely predict a breakdown, its cascading effect and their consequences on territories and populations.

If traditional risk management strategies, such as planning and prevention, are not adapted to face to this unpredictable breakdown, a new kind of urban risk strategy appeared a decade ago, the resilience strategy [5]. This work is defending the idea that a strategy based on the concept of vulnerability and precaution may have many limitations and is not adapted to a visionary policy and management. After defining and defending the concept of resilience, we will expose some examples with resilience strategies.

3. Resilience to cascading effects: From a theoretical paradigm to strategic approaches

Since Hurricane Katrina and its consequences in New Orleans in 2005, the attention of scientists, urban managers and politicians has been focused on the concept of resilience as a new paradigm for the implementation of more integrated risk management in a systemic manner. To avoid the recurrence of such a dramatic episode about 1400 deaths in Louisiana [35] and also costly $ 82 billion [2], experts began to re-question their risk management policy. A new approach has been gradually integrated, based on the concept of urban resilience. This term - from the Latin *resilio* (*re*, back; *salir*, jump) - has gradually been incorporated into scientific and political discourses in order to adapt to the expansive and uncertain growth of urban areas [24]. However, the term resilience is somewhat vague and inconsistent, probably because of its overuse, thus transforming the concept into a portmanteau word or buzzword [36]. If, historically speaking, the concept of resilience appeared in physical field to describe the return to the previous state of an element, it was the field of psychiatry that served to popularize the term. For the psychiatrist Boris Cyrulnik, resilience is a capacity to take back a development despite trauma. It is understood as the ability to withstand a shock, both in resisting and adapting, in order to restore acceptable functioning [11]. Adapting to the ecological field [18], resilience is defined as the capacity of a system to absorb disturbances and to recover after a major disruption and to restart an activity on the territory. The concept emphasizes the idea that disturbance - or shock - is not (or not anymore) necessarily negative, but is fully involved into the creation of a new model by supporting the idea of innovation, learning, rebound and change. The Latin etymology of the term resilience underlines this ability to overcome a crisis. It is thus a proactive capacity that the system must develop in order to (re) act in the face of the catastrophe and develop learning and anticipation abilities [12], accepting by this way the inevitability of change and trying to create a system capable of adapting to new conditions and obligations [19]. The altered system must therefore be able to evolve, adapt, re-establish, maintain or create a balance of functioning. Resilience refers to capacity as well as absorptive and recovery capacity [38], to a learning ability [45,47], or adaptability capacity [39].

This work considers that resilience is intrinsic to the environment, that it is inherent in the internal functioning of the system. There is then not necessarily a need for a shock to be resilient, this capacity can be pre-existing to the crisis. However, this quality can be revealed by the shock. Resilience factors can therefore be identified a-chronically so as to study and develop the potential for resilience [36]. Resilience term always refers to a return to an acceptable equilibrium, whether pre-shock or new one. Therefore, it is a concept that refers to a technical, urban, social, architectural, economic and political innovation and that allows a questioning of our risk management systems. This injunction to innovation adapts perfectly to the urban, economic, political, social and ecological complexity of the contemporary and urban world.

However, despite the significant increase of the use of the term resilience [24] in urban practices, concrete advances still have to be made. The majority of nowadays' work is essentially based on a technical-organizational resilience but without taking into account its social dimension. The objective is therefore to facilitate the understanding of this concept, and especially its integration in management and planning policies, at the crossroads of urban, technical and social resilience. This work aims to operationalize resilience by creating a spatial decision support tool that would integrate the theoretical concept into urban practices and flood risk management policies to decrease negative impacts of flooding and its potential cascading effects. Our proposal is divided in two parts, one work already achieved, proposing a technical approach and acting on urban networks, and a current work – part of a research thesis – in order to build a global resilience approach. These two kinds of approaches are built as a continuum.

3.1. Urban resilience strategy

Urban resilience is on the one hand, the capacity of a city to maintain functions during crisis and on the other hand the capacity of the city to reconstruct itself after disturbance [22,44]. The city is considered in this case as a complex system, integrating the components and interactions of inhabitants, activities, infrastructures, governance, uses, habits, etc. Toubin et al., [44]. If there is no one and only definition of the city, it is mainly because the city is linked to its society, evolves and changes with it and, therefore, is not a static element [44]. Indeed, the city is a space, perceived, lived, understood, thought by its

citizens and practitioners. Cities are a complex combination between history, natural conditions, economic activities, urban and architectural management, and political policies. However, urban management strategies have to handle this complexity, in order to offer a living environment that is adapted and safe. The increasing concentration of populations in cities, associated with the rise of natural risks, makes this urban management even more complex. The change in cities – new actors, new interdependencies, new infrastructures, new dependencies, new activities, economies, relationships – associated with new urban vulnerabilities – pollution, infrastructure breakdowns, social tensions, space tensions, political tensions – create new kinds of risks and require another way to manage these weaknesses.

3.2. Analyzing risk areas

In order to build a strategy of resilience, it is necessary to define which elements make resilience and which urban elements are vulnerable and able to create domino effects. Many studies have examined which, in the urban area, was more or less resilient and which characteristics increase or decrease resilience factor.

3.2.1. A technical approach

As we already mentioned before, urban networks are able to propagate flood risk [22,41] and to increase territory vulnerability. They are simultaneously the “entry point of risk” and essential for the management at the very first moment of the crisis and in the reconstruction phase. A city is a kind of crossroads, where all functions and activities hang out. Thus, if urban networks can be synonymous with wealth by transferring goods and populations, they can also be a source of vulnerability by propagating disturbances because of their interdependences [44]. They seem so necessary to build a resilient city. Three capacities have been analyzed in this study, in order to characterize the resilience of urban networks, and developed into the DS3 Model [2,3,38,40]; resistance, absorption and recovery capacities (Fig. 2).

Resistance capacity is considered as the beginning for all resilience studies. The goal of this step is analyzing physical damages [41]. To begin with, it is essential to know any risk management and actions, to plan the potential damages of a system, in order to adapt resilience strategy. It is estimated that, the more the technical system is damaged, the greater is the possibility of a malfunction of the system and the more it will be difficult to restore it to service. The operating reliability methods are used in this case, in order to take account of the interdependencies between the different networks producing domino or cascading effects.

Absorption capacity includes potential alternatives which networks can have, despite of failure of one or more of its components [22]. In other words, analyze network's configuration is a way to characterize its redundancy.

Recovery ability can be the time required to restore one of its damaged components to normal service. It appears as the main resilience characteristic [38,41]. In this case, recovery does not mean that system must return to a previous equilibrium but that it should find a new mode of operation [38].

This conceptual model is considering cities as complex systems and integrate several notions of resilience. It includes the urban systemic model for the propagation of flood risk in the city by protective infrastructures and technical networks and resilience concepts as redundancy (capacity to absorb risk) and rebound (recovery capacity). Besides these characteristics, the resistance capacities of infrastructures are added to the evaluation of resilience.

3.2.2. A holistic resilience approach

This precedent study is focused on the technical aspect of resilience. Our current research is concentrated on multiple social and territorial dimensions which could increase or decrease resilience. As we defined it before, resilience is still considered as the ability of a community and its territory to plan for, absorb, recover from, adapt, learn and evolve despite – or thanks to- a shock. But evaluating a resilience proportion is not so easy. In this particular case, we understood resilience as inherent capacities, which we may be able to study without a specific shock. This philosophy has allowed to analyze interactions between human, urban environment, technical environment, political environment systems [8].

Over the last decade, more and more indicators have been used in the risk research, and more precisely to measure vulnerability of territories and populations at risks [9]. A vulnerability indicator can be defined as a tool able to provide data about susceptibility, fragility, vulnerability, adaptability and resilience of a system [15,4]. Some choices of indicator methodology and their construction have been made based on the hypothesis that vulnerability and resilience are linked [10,42,8]. In this research we developed variables in order to study both inherent vulnerabilities and inherent resilience of a society and its territory. It is established here that these variables indicate a *potential* for resilience in order to revive a social, economic, urban, and systemic activity after a shock. A resilience index was therefore

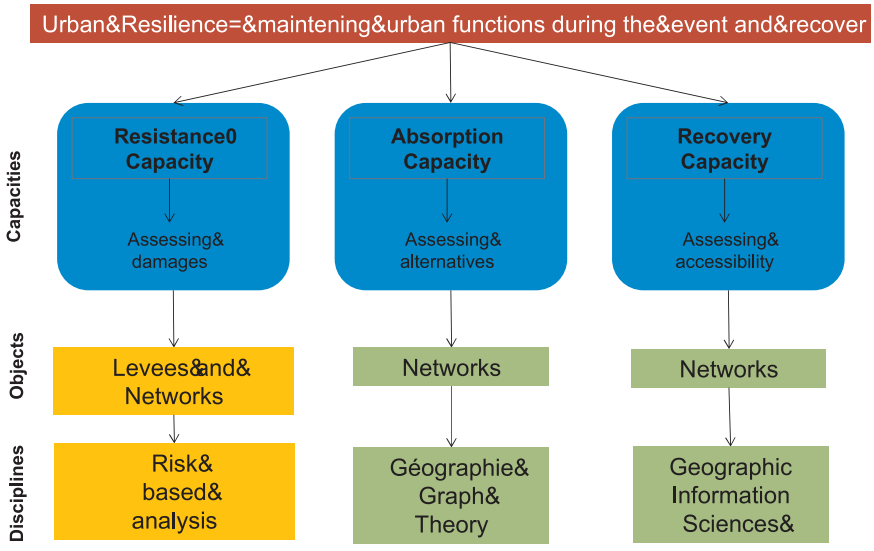

Fig. 2. DS3 Model representation [38].

Table 1
Variables sources.

Indicators	Variables	Sources
Social'Indicator	• %'of'active'people • %'of'women • Age'of'population • Highest diploma • Median of'salary • Vulnerable population • Etc.	INSEE'
	• Risk knowledge • Risk perception'	Social'questionnaires
Urban Indicator	• Critical infrastructure • Urban density • Aging of'buildings • Etc.	INSEE,'Avignon's data
Technical Indicator	• Urban networks • Aging of'networks • Etc.	INSEE,'Avignon's data

Fig. 3. Resilience variables.

constructed on the basis of three indicators of urban, social and technical resilience. The choice of a hierarchical index [42] was justified by the possibility of creating indicators with several variables (Table 1), themselves divided into subgroups (Fig. 3), so as to nuance the interpretation of resilience. The variables of each indicator were based on an analysis of the scientific literature [1,10,13,22,28,31,37,40,42] in order to analyze the different social (age of the population, level of education, knowledge of risk, etc.), urban (urban structure, economic dynamics, state of structures, etc.) and technical components of the territory. The scientific consensus that resilience is multidisciplinary has led to the selection of data including the social, economic, institutional, infrastructure and community structure [37,9]. Thanks to the indicators' methodology, it is now possible to explore social, urban, technical phenomena and to determine which area is more or less resilient by a comparative work [27].

Then, each variable is placed on a positive or negative curve of resilience. This definition of the parameters corresponds to a unique form of deviation [17] for each variable, thus making it possible to vary the overall value of the resilience per indicator. If the value of the resilience curves is different for each variable, the weighting is 1 for all variables. This choice of single weighting is explained by the desire to avoid disparities between the variables, some of them being sensitive and subjective (% of foreign people, level of education, etc.). In order to create a generic tool that can be used by different actors, all the indicators are built using national data in Open Data (INSEE or SIREN) and Open Source. The resiliency calculation for each variable and indicator is built using a Data Management Engine (ETL), the Feature Manipulation Engine, used by the GIS service of French cities. Maps and analyses are done on QGIS. The spatial scale of analysis is local and (is) explained by the desire to work with local actors in order to answer precisely to their problems of management facing the risk of flooding. Thus, urban projects at the neighborhood or macro-lot levels will be analyzed in terms of their contribution to the intrinsic resilience of the neighborhood. This scale of neighborhood or urban project, so far little practiced [2] allows to act directly on the territory, to innovate, to experiment and to test new practices [3] directly with the managers. As a result, the main scale of study chosen to assess urban resilience is as accuracy as possible, i.e. at the IRIS scale. This scale is located between the 200 × 200 grid (INSEE) and the District Council. Each computation is therefore multi-scalar but also multi-temporal. Indeed, the resilience to risks must be imagined according to a multi-temporal paradigm, to act before the crisis, i.e. to anticipate (urban planning); and to recover from the event (to rebuild, to restore an activity, to adapt).

The technical approach emphasizes the importance of taking into account critical infrastructure, and more specifically urban networks facing flood risk. Focusing on the impacts of potential dysfunctions of urban networks at neighborhood scale was an innovative approach because of the capacity to determine the level of resilience of a neighborhood from a technical perspective. Offering a conceptual tool for neighborhood-level resilience analysis (DS3), this approach defined and developed three resilience characteristics. Thus, by defining and operationalizing resilience, this analysis tool makes it possible to identify resilience characteristics at the neighborhood scale.

Even if this approach is innovative, its analysis is limited. Considering that the urban system is an evolving, changing and dynamic system, with an urban renewal of about 1% every year, analyzing resilience characteristics only via urban networks in new neighborhood

remains reductive as it is considering only small areas compared to city size. To complete this approach with a holistic approach for resilience assessment is currently in progress. This holistic resilience assessment aims at assessing level of resilience to risks including social, urban and technical (based on the development of the DS3 model) indicators. Our hypothesis here is that the holistic resilience assessment could help to define resilience strategies at several spatial scales, including historical neighborhoods. Also, analysis of resilience with this approach could measure how resilient to flood new neighborhood development can contribute to resilience to floods at other spatial scales. This is what we are testing in the Avignon case study.

4. Applications in Hamburg and Avignon

These two different approaches, technical and holistic approaches, have been built as a continuum. Our work started by the application of the technical approach, especially in Hamburg. After the introduction of this case study and its results, we will present our current work, built in the continuity and thanks to the observations and limits highlighted by the technical approach. This work, constructed as part of a thesis, presents a more global approach to resilience.

4.1. DS3 at neighborhood scale: Am Sandtorkai / dalmannkai, Hamburg

The DS3 model has been tested in a neighborhood of Hamburg in the Northwest of HafenCity in order to build an attractive living environment. The Am Sandtorkai / Dalmannkai neighborhood is a dense urban area, with a young population co-existing with seniors. As it is outside the Hamburg's dike line, this area is subjected to flooding [38]. Affected by storm surges up to 5 or to 6 m [38] and pluvial floods, Hamburg, and specifically this neighborhood, is vulnerable. The neighborhood is vast (about 10 ha) and its density is 137.61 inhabitants per hectares. This area is connected with the city by 4 bridges, but only one of them is flood-secure. However the neighborhood developed several modes of transport; “soft” modes of transport as bicycle, and has integrated the flood risk, building roads above the flood-line reference [38]. Based on the three resilience characteristics, resistance, absorption, recovery capacities, some characteristics have been defined as increasing resilience ability of the neighborhood or not.

The diversity in transportation – public, soft, private modes and particularly urban networks above the higher reference water level - connecting the neighborhood to the entire city is a good element to develop and increase resistance, absorption, and recovery capacities. Develop and mix energy supply (renewable energy source for instance), promote the multi-functionality of buildings, integrate the water level reference in every construction, are also aspects which could increase resilience (Fig. 4).

The contribution of the use of DS3 Model identified factors that would lead to increase urban resilience, highlighting the importance of urban networks and critical infrastructure. However, this technical approach is essentially focusing on urban networks. But cities are composed by many factors, as social dynamics, urban interactions and technical components. The holistic approach is based on the building a methodology in order to study these components, and answer to these global issues.

4.2. Mapping urban resilience

The holistic resilience research has been built with the Avignon community, in Provence-Alpes-Côte d’Azur (PACA) region, in order to concretize the theoretical approach. The City, faced with physical (Rhône-Durance rivers confluence) and human tensions, needed a decision-making tool to integrate the concept of resilience into practices. This is carried out in partnership with the urban and technical services of Avignon. Indeed, even if the city is already equipped with communication and protection tools (Flood risk prevention Plan (PPRI), Plan to determine territories with flood risks (TRI), Municipal information document on major risks (DICRIM)), the concept of resilience is, as stated earlier, still very little developed. A decision-making tool to integrate this concept with urban practices would be extremely innovative and useful for a community vulnerable to flooding. This collaboration enriches the theoretical work of research by integrating it more closely with the social, urbanistic, architectural, political and economic needs of the community. It is therefore a work at the frontier between practical and professional application and theoretical research. Preliminary results illustrate an independent resilience of a specific flood scenario. The indicators allow to independently map each variable and each indicator (Fig. 5, Fig. 6), but also to condense them to create an overall index of resilience. Fig. 5 has been built thanks to social resilience variables, as population structure data (age of population, INSEE data); professional situation (INSEE data); habits (INSEE data); education (INSEE data), etc. These variables have been aggregated in order to map a global social resilience indicator for a scenario “during crisis”. (The) Fig. 6 has been built on urban resilience variables such as buildings’ characteristics (construction date, SIREN data), location of critical infrastructures (SIREN data), economic dynamic (business creation and closure, SIREN data), etc. These variables have been also aggregated in order to map a global urban resilience indicator for a scenario “during crisis”. The local scale chosen as well as this dissociation between variables and indicators makes it possible to analyze precisely the components that accentuate or diminish the resilience.

Even if these maps have been designed according to the different temporalities of a crisis (before, during, after), the flood hazard (water levels, rainfall, etc.) has not been integrated into the calculation (as a physical component). It is therefore an objective resiliency that is represented here, independently of a specific risk. Despite the fact that calculation parameters were created in relation to a temporality (before, during and after the crisis), the physical and geographic components (width of the catchment, land cover, vegetation cover, etc.) have not yet been included in the calculation. A hazard indicator has been created, but it is still necessary to work on different simulations by integrating the spatial (spatial risk) and temporal (flood duration, flood and flood) parameters. Finally, with the idea of measuring the existing resilience but above all the impact of future floods on the dynamics of the city, it was interesting to locate spatial projects spatially during the period 2015–2020. These are as varied as the rehabilitation of some roads, as the creation of a tram line or new eco-neighborhoods, but each of them participates in a structural and landscape renewal of the city. These projects are to date simply spatialized in the resilience maps but are not yet integrated into any calculation as an independent variable. A selection of key projects (large-scale urban projects) is also underway.

Being able to measure urban resilience variable by variable helps to determine which urban, technical (critical infrastructure) and social (population structure) elements are enough resilient or not [25]. As a result, city management will focus on developing less resilient elements so as to increase the resilience in the long term.

5. Conclusion and perspectives

The international examples of urban disasters and their cascading effects demonstrated the significant modern challenges of urban flood management, especially in an uncertain context. In the urban context, it is also an innovation to build an urban resilience strategy. While the concept of resilience still remains vague and imprecise in many aspects, the international work of the various researchers and risk managers succeeds in allowing us to perceive characteristics that a territory must develop or acquire in order to be resilient and to face risks. The concept of resilience provides interesting answers to take into account complex and multi-scale systems such as the city and its technical networks.

The described case studies have been chosen to emphasize the capacities of preparation, resistance and adaptation, capacities that are

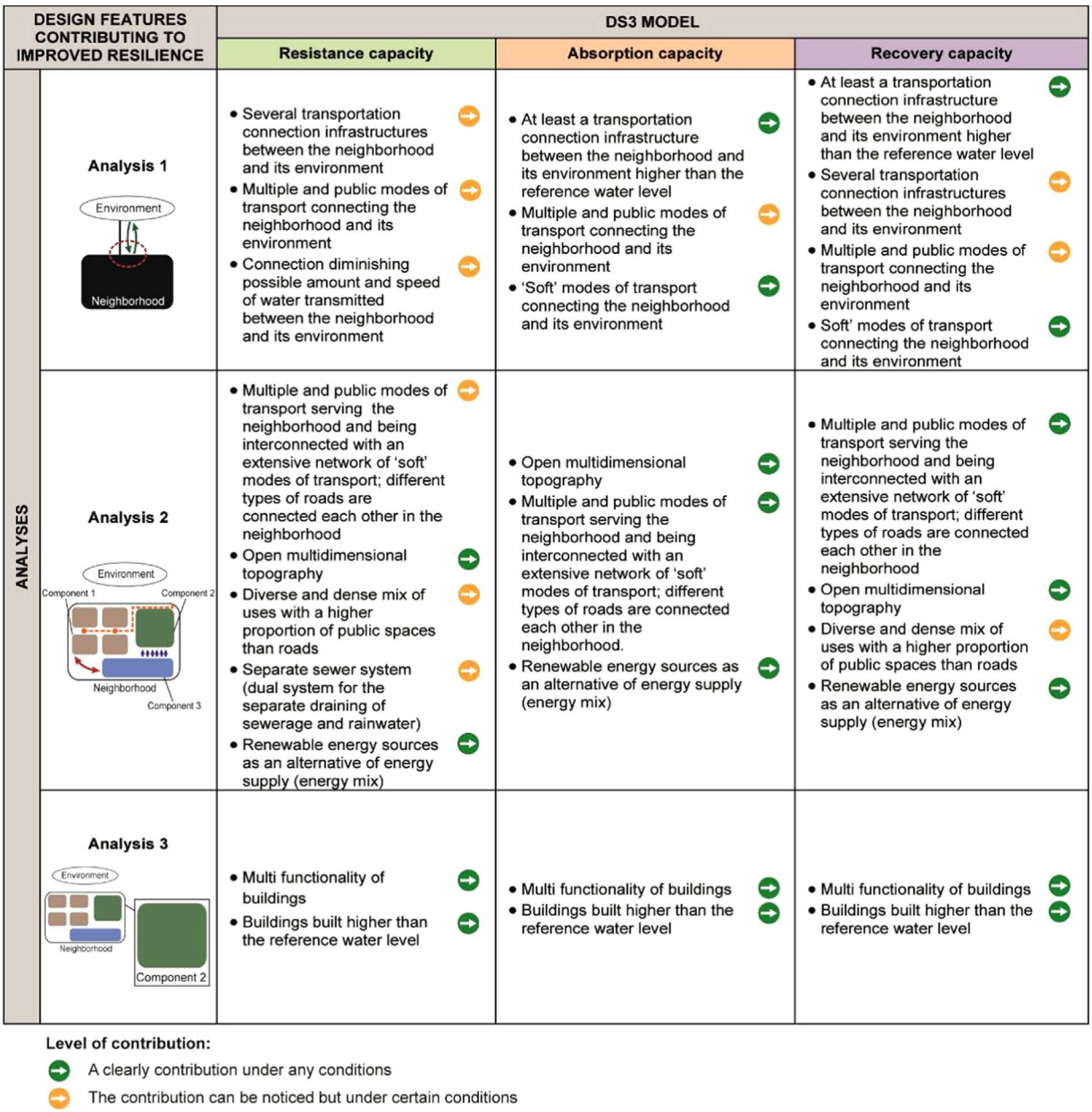

Fig. 4. Synthesis of study results [38].

declined according to the different temporalities of a flood. These studies thus developed an analysis adapted to the multi-temporal form of a crisis but also to an accurate spatial scale. Moreover, these researches have sought to develop a science – policy dialog with territorial managers, to integrate the concept of resilience into public policies and automatisms. By these works, we analyzed both technical resilience by measuring capacities of the technical systems to resist, to absorb then to recover from a perturbation and global – or organizational- resilience highlighting which urban factors were able to enhance or decrease resilience. The application of these strategies to specific territories demonstrates their feasibility and usefulness in so-called risk territories. In addition, the research-practice partnerships underline the growing need for territories and communities to acquire tools in order to better understand the concept of resilience, and especially to apply it practically to their territories, habits, populations, operating modes, knowledge and perspectives. For example, the city of Avignon already uses the new social resilience database in order to study the urban well-being and quality of life at a local scale. With these new data, the city is planning to create a decision support tool to influence urban renewal projects to analyze the quality of social and urban life. In addition, an order has already been made by the Director General of Services (DGS) of the city of Avignon to the GIS service to create a demographic and social atlas on the community, thanks to the new data provided by the research work.

Combining these results should be interesting to understand globally urban resilience and to build a strategy to increase urban capacities to face floods. Finally, it would be interesting to provide a comprehensive index on urban resilience, an index that makes sense in the international approaches [43]. The importance given to the generic nature of the tools allows testing the urban resilience tool or index elsewhere. The holistic approach should be carried out in La Rochelle (France), Mons (Belgium) and Québec (Canada). Since the objective is always to use open source data, in order to make the tool accessible and useful for all types of future users, it would be interesting to test this methodology in other cities in various contexts and observe if same data are available. Thus, the systemic comparison of resilience will shed

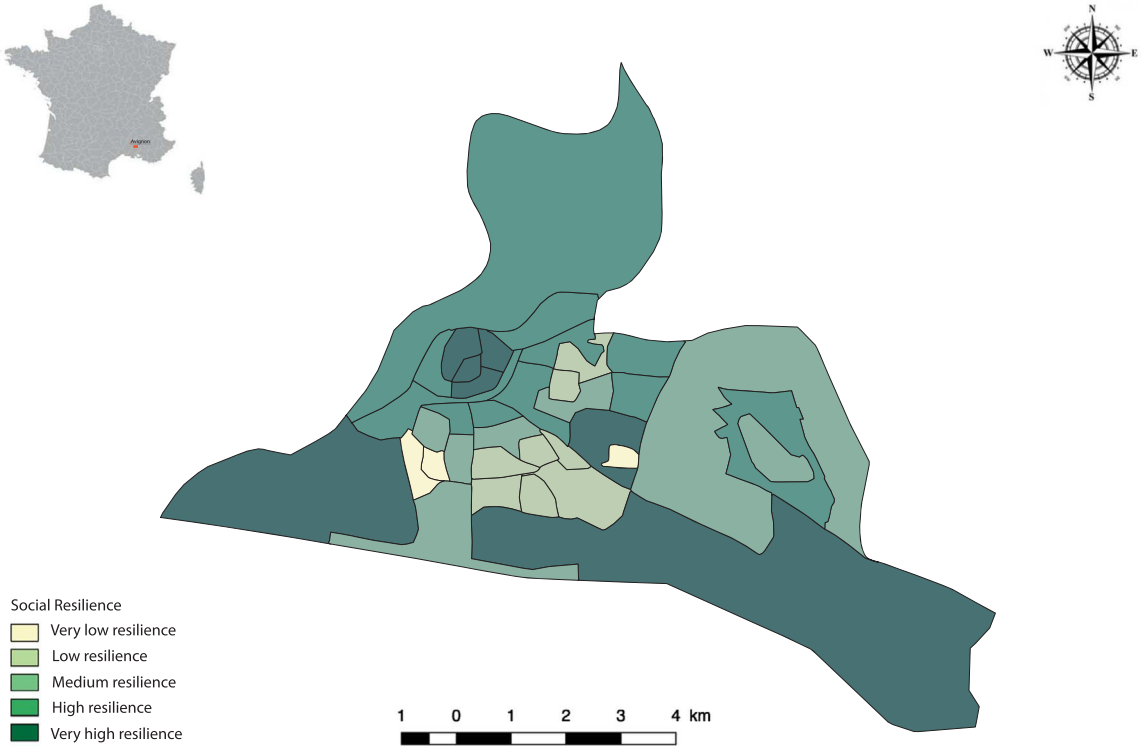

Fig. 5. Social Resilience Mapping - Scenario During Crisis.

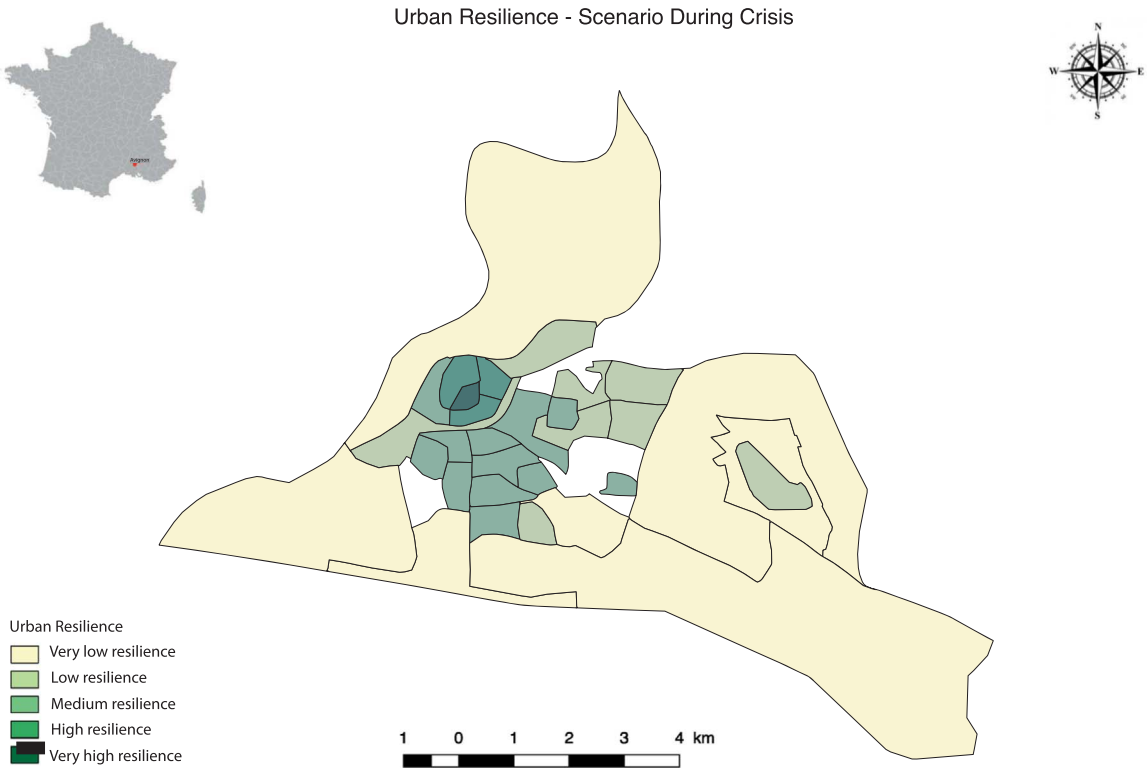

Fig. 6. Urban Resilience Mapping - Scenario During Crisis.

light on the limits of results and work towards their improvement. Finally, to measure the existing resilience and especially the impact of future flood events on the dynamics of cities, it would be interesting to study the resilience impact of future urban projects in the period 2015–2020. Do they increase or decrease urban resilience? This tool would be essential to analyze the impact of urban projects and their involvement in the development of a resilience strategy.

References

[1] W.N. Adger, N. Brooks, G. Bentham, M. Agnew, S. Eriksen, New Indicators of Vulnerability and Adaptive Capacity 122 Tyndall Centre for Climate Change Research Norwich, 2004 (Consulté à l'adresse), ⟨http://www.tyndall.ac.uk/sites/

default/files/Adger%20W.%20N%20.,%20Brooks,%20N.%20,%20Kelly,%20M.,%20Bentham,%20S.%20and%20Eriksen,%20S.%20(2004)%20New%20indicators%20of%20vulnerability%20and%20adaptive%20capacity%20(tr7).pdf〉.

[2] M. Balsells, B. Barroca, V. Becue, D. Serre, Making urban flood resilience more operational: current practice, Proc. Inst. Civ. Eng. - Water Manag. 168 (2) (2015) 57–65, http://dx.doi.org/10.1680/wama.14.00051.

[3] B. Barroca, D. Serre, Behind The Barriers: A Resilience Conceptual Model. S.A.P.I. EN.S. Surveys and Perspectives Integrating Environment and Society, (6.1). Consulté à l'adresse 〈https://sapiens.revues.org/1529〉, 2013.

[4] J. Birkmann, Indicators and criteria for measuring vulnerability: theorical bases and requirements. In *Measuring vulnerability to natural hazards: towards disaster resilient societies*. Tokyo: UNU-Press, 2006.

[5] A. Boin, A. McConnell, Preparing for critical infrastructure breakdowns: the limits of crisis management and the need for resilience, J. Contingencies Crisis Manag. 15 (1) (2007) 50–59.

[6] Caisse Centrale de Réassurance, *Ouragan Irma: CCR évalue à environ 1,2 milliard d'euros le coût des dommages assurés pour les îles de Saint-Martin et Saint-Barthélemy*. (Hurricane Irma: CCR estimates the cost of insured damage for the islands of St. Martin and St. Barthelemy at around 1.2 billion euros), 2017.

[7] Catastrophes Naturelles-Observatoire permanent des catastrophes naturelles et des risques naturels, Bilan statistique des catastrophes naturelles survenues dans le Monde entre 2002–2015. (Statistical assessment of natural disasters occurring in the world between 2002–2015). Consulté à l'adresse 〈https://www.catnat.net/donneesstats/dernieres-actualites/21507-bilan-statistique-des-catastrophes-naturelles-survenues-dans-le-monde-entre-2001-2015-2〉, 2016.

[8] S.L. Cutter, K.D. Ash, C.T. Emrich, The geographies of community disaster resilience, Glob. Environ. Change 29 (2014) 65–77, http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.08.005.

[9] S.L. Cutter, L. Barnes, M. Berry, C. Burton, E. Evans, E. Tate, J. Webb, A place-based model for understanding community resilience to natural disasters, Glob. Environ. Change 18 (4) (2008) 598–606, http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.07.013.

[10] S.L. Cutter, C.G. Burton, C.T. Emrich, Disaster resilience indicators for benchmarking baseline conditions, J. Homel. Secur. Emerg. Manag. 7 (1) (2010), http://dx.doi.org/10.2202/1547-7355.1732.

[11] B. Cyrulnik, G. Jorland, Résilience: connaissances de base, Resilience: basic knowledge, Odile Jacob, 2012.

[12] A. Dauphiné, D. Provitolo, La résilience: un concept pour la gestion des risques. (Resilience: a concept for risk management), Ann. De. géographie 654 (2) (2007) 115, http://dx.doi.org/10.3917/ag.654.0115.

[13] U.M.K. Eidsvig, A. McLean, B.V. Vangelsten, B. Kalsnes, R.L. Ciurean, S. Argyroudis, G. Kaiser, Assessment of socioeconomic vulnerability to landslides using an indicator-based approach: methodology and case studies, Bull. Eng. Geology Environ. 73 (2) (2014) 307–324, http://dx.doi.org/10.1007/s10064-014-0571-2.

[14] European commission, *GREEN PAPER on the insurance of natural and man-made disasters 21*. Strasbourg, 2013.

[15] A. Fekete, Validation of a social vulnerability index in context to river-floods in Germany, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 9 (2) (2009) 393–403, http://dx.doi.org/10.5194/nhess-9-393-2009.

[16] J.-P. Galland, Critique de la notion d'infrastructure critique. (Criticism of critical infrastructure concept), Flux (81) (2010) 6–18.

[17] I.S. Holand, P. Lujala, J.K. Rød, Social vulnerability assessment for Norway: a quantitative approach, Nor. Geogr. Tidsskr. - Nor. J. Geography 65 (1) (2011) 1–17, http://dx.doi.org/10.1080/00291951.2010.550167.

[18] C.S. Holling, Resilience and stability of ecological systems, Annu. Rev. Ecol. Syst. 4 (1) (1973) 1–23.

[19] R.J.T. Klein, R.J. Nicholls, F. Thomalla, Resilience to natural hazards: How useful is this concept? Environ. Hazards 5 (1) (2003) 35–45, http://dx.doi.org/10.1016/j.hazards.2004.02.001.

[20] M. Kunz, B. Mühr, T. Kunz-Plapp, J.E. Daniell, B. Khazai, F. Wenzel, J. Zschau, Investigation of superstorm Sandy 2012 in a multi-disciplinary approach, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 13 (10) (2013) 2579–2598, http://dx.doi.org/10.5194/nhess-13-2579-2013.

[21] Le Haut Comité Français pour la Défense Civile, Retex suite à l'Ouragan Sandy, Retex after Hurricane Sandy, 2013.

[22] S. Lhomme, D. Serre, Y. Diab, R. Laganier, Analyzing resilience of urban networks: a preliminary step towards more flood resilient cities, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 13 (2) (2013) 221–230, http://dx.doi.org/10.5194/nhess-13-221-2013.

[23] M. Mann, août 28). It's a fact: climate change made Hurricane Harvey more deadly. The Guardian. Consulté à l'adresse 〈https://www.theguardian.com/commentisfree/2017/aug/28/climate-change-hurricane-harvey-more-deadly〉, 2017.

[24] S. Meerow, J.P. Newell, M. Stults, Defining urban resilience: a review, Landsc. Urban Plan. 147 (2016) 38–49, http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.11.011.

[25] A. Milman, A. Short, Incorporating resilience into sustainability indicators: an example for the urban water sector, Glob. Environ. Change 18 (4) (2008) 758–767, http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.08.002.

[26] Mitigation Assessment Team Report, Hurricane Sandy in New Jersey and New York. Building Performance Observations, Recommendations, and Technical Guidance, Federal Emergency Mangement Agency, 2013.

[27] A. Müller, J. Reiter, U. Weiland, Assessment of urban vulnerability towards floods using an indicator-based approach – a case study for Santiago de Chile, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 11 (8) (2011) 2107–2123, http://dx.doi.org/10.5194/nhess-11-2107-2011.

[28] K.V. Nguyen, H. James, Measuring household resilience to floods: a case study in the Vietnamese Mekong river delta, Ecol. Soc. 18 (3) (2013), http://dx.doi.org/10.5751/ES-05427-180313.

[29] M. Nones, G. Pescaroli, Implications of cascading effects for the EU Floods Directive, Int. J. River Basin Manag. 14 (2) (2016) 195–204, http://dx.doi.org/10.1080/15715124.2016.1149074.

[30] V. November, M. Penelas, P. Viot, *Habiter les territoires à risques*. (Living in the territories at risk). PPUR, 2011.

[31] T. Opach, J.K. Rød, Cartographic Visualization of Vulnerability to Natural Hazards, Cartogr.: Int. J. Geogr. Inf. Geovisualization 48 (2) (2013) 113–125, http://dx.doi.org/10.3138/carto.48.2.1840.

[32] G. Pescaroli, I. Kelman, How critical infrastructure orients international relief in cascading disasters, J. Contingencies Crisis Manag. 25 (2) (2017) 56–67, http://dx.doi.org/10.1111/1468-5973.12118.

[33] G. Pescaroli, M. Nones, Cascading Events, Technology and the Floods Directive: future challenges. *E3S Web of Conferences*, *7*, 7003. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160707003, 2016.

[34] B. Quenault, La résurgence/convergence du triptyque « catastrophe-résilience-adaptation » pour (re)penser la « fabrique urbaine » face aux risques climatiques. (The resurgence / convergence of the triptych "disaster-resilience-adaptation" to (re) think the "urban factory" in the face of climate risks.) Développement durable et territoires, 5, 3. https://doi.org/10.4000/developpementdurable.10683, 2014.

[35] M. Reghezza-Zitt, S. Rufat, Resilience Imperative: Uncertainty, Risks and Disasters, (ISTE Press). Elsevier, 2016.

[36] M. Reghezza-Zitt, S. Rufat, G. Djament-Tran, A. Le Blanc, S. Lhomme, What resilience is not: uses and abuses, Cybergeo (2012), http://dx.doi.org/10.4000/cybergeo.25554.

[37] S. Rufat, E. Tate, C.G. Burton, A.S. Maroof, Social vulnerability to floods: review of case studies and implications for measurement, Int. J. Disaster Risk Reduct. 14 (2015) 470–486, http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdrr.2015.09.013.

[38] D. Serre, DS3 model testing: assessing critical infrastructure network flood resilience at the neighbourhood scale, in: A. Fekete, F. Fiedrich (Eds.), Urban Disaster Resilience and Security, Springer International Publishing, Cham, 2018, pp. 207–220, , http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-68606-6_13.

[39] D. Serre, B. Barroca, Preface « Natural hazard resilient cities », Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 13 (10) (2013) 2675–2678, http://dx.doi.org/10.5194/nhess-13-2675-2013.

[40] D. Serre, B. Barroca, M. Balsells, V. Becue, Contributing to urban resilience to floods with neighbourhood design: the case of Am Sandtorkai/Dalmannkai in Hamburg, J. Flood Risk Manag. (2016), http://dx.doi.org/10.1111/jfr3.12253.

[41] D. Serre, B. Barroca, R. Laganier (Eds.), Resilience and Urban Risk Management, CRC Press Balkema, Taylor & Francis Group, 2013(ISBN 978-0-415-62147-2).

[42] E. Tate, Social vulnerability indices: a comparative assessment using uncertainty and sensitivity analysis, Nat. Hazards 63 (2) (2012) 325–347, http://dx.doi.org/10.1007/s11069-012-0152-2.

[43] The Rockefeller Foundation, *City Resilience Index*, 2015.

[44] M. Toubin, R. Laganier, Y. Diab, D. Serre, Improving the conditions for urban resilience through collaborative learning of parisian urban services, J. Urban Plan. Dev. 141 (4) (2015) 5014021, http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000229.

[45] L.J. Vale, T.J. Campanella, The Resilient City, How modern Cities Recover from Disaster. Broché, 2005.

[46] F. Vinet, Floods. 2, (ISTE Press-Elsevier, Vol. 2). ISTE Press -Elsevier, 2017.

[47] C. Zevenbergen, Flood Resilience. In Resource Guide on Resilience, 2016.

[48] C. Zevenbergen, A. Cashman, N. Evelpidou, E. Pasche, S. Garvin, R. Ashley, Urban Flood Management, CRC Press, 2010.

1.2. Élaboration d'une approche globale de résilience : apports et limites

Cet article a permis de lister les enjeux liés aux espaces urbains, ainsi qu'à leurs infrastructures, essentielles au fonctionnement de la ville. Après avoir évoqué des événements destructeurs et catastrophiques par leurs effets domino, l'article a exposé deux approches de résilience. Cet article défend l'idée que ce concept est une des clefs de la préparation des territoires aux changements climatiques et aux incertitudes qui y sont liées.

La première stratégie de résilience aborde les enjeux de la résilience technique, c'est-à-dire la résilience des réseaux techniques urbains. Définis comme caractéristiques d'une urbanisation réticulaire, les réseaux techniques urbains sont une des clefs d'entrée pour aborder le concept de résilience. Étudiés sous plusieurs angles (résistance, absorption et récupération), les réseaux peuvent être à la fois vecteurs de vulnérabilité ou bien de résilience. Le modèle DS3, après avoir établi ces critères de définition et de mesure de résilience, a permis de développer un outil d'aide à la décision pour opérationnaliser la résilience. Cet outil d'aide à la décision a fourni des évaluations sur les capacités de résilience à l'échelle de la ville puis à l'échelle du quartier. Malgré des tests prometteurs à l'échelle du quartier Am Sandtorkai/Dakmannkai à Hambourg, cette recherche a été limitée par son approche de la résilience technico-fonctionnelle.

Après avoir constaté les avancées et les limites de cette tentative d'opérationnalisation de la résilience, une deuxième approche a émergé afin d'aborder la résilience sous un prisme plus large : aux questions de la résilience techniques viennent s'ajouter une dimension sociale et une dimension urbaine. Cette approche s'est construite autour d'une méthodologie collaborative et autour de trois indicateurs de définition et de mesure de résilience, une résilience urbaine, technique et sociale. Le système spatial d'aide à la décision a été conçu en collaboration avec le service SIG de la ville d'Avignon afin d'intégrer, dès le début de la réflexion, les aménageurs et acteurs locaux pour faciliter la compréhension et l'appropriation du concept de résilience urbaine. L'objectif de construire ces trois indicateurs de mesure est d'aborder de manière systémique les interactions spatiales et sociales. Cet article fait état des premiers résultats dans ce domaine :

- L'élaboration d'un cadre conceptuel de définition de critères de résilience ;
- La construction de deux indicateurs sur trois, l'indicateur de résilience sociale et l'indicateur de résilience urbaine ;
- Une cartographie du potentiel de résilience à l'échelle des IRIS (Ilots Regroupés pour l'Information Statistique), l'échelle spatiale utilisée par l'INSEE;
- Une méthodologie mettant l'accent sur des données et des outils en libre accès.

Les résultats développés dans cet article sont construits à l'aide des deux premiers indicateurs de mesure : l'indicateur de résilience sociale et l'indicateur de résilience urbaine. Certaines variables ont été développées à l'aide de données « sensibles » fournies par la mairie.

La suite de la thèse a permis de répondre à certaines limites. L'article 2 illustre le modèle conceptuel de résilience et la valorisation des données et outils en libre accès. L'article 3 met en avant l'intérêt d'utiliser des techniques de géovisualisation afin de modéliser et opérationnaliser le concept de résilience. Enfin l'article 4 explique la nécessité de travailler à chaque étape de la recherche avec les acteurs locaux pour nuancer les résultats et les confronter aux pratiques et connaissances locales de la gestion des risques.

2. « Operationalizing urban resilience to floods in embanked territories – Application in Avignon, Provence Alpes Côte d'Azur Region »

Statut de l'article n°2 : Publié dans *Safety Science* en Octobre 2019

◊ Heinzlef, C., Becue V., et Serre D. « Operationalizing Urban Resilience to Floods in Embanked Territories – Application in Avignon, Provence Alpes Côte D'azur Region ». *Safety Science* 118 (2019): 181-93. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.05.003.

2.1. L'opérationnalisation de la résilience : contexte

La sur-urbanisation couplée au changement climatique a entraîné une augmentation des inondations urbaines, tant en fréquence qu'en intensité (Abshirini et al., 2017; Popovska and Ivanoski, 2009). Confrontés à des incertitudes croissantes, les gestionnaires s'efforcent de trouver des stratégies de gestion des risques appropriées. De nombreux gouvernements et les décideurs ont reconnu la nécessité d'adopter des politiques et des stratégies de gestion des inondations plus résilientes pour un développement urbain durable (Toubin et al., 2012). Cependant, ce concept reste encore très abstrait pour beaucoup d'acteurs, un mot à la mode certes, mais difficile à opérationnaliser. L'objectif de cet article est de proposer une méthodologie afin de concrétiser la résilience urbaine face aux inondations. Pour cela, un outil spatial d'aide à la décision est construit conjointement avec les gestionnaires urbains. La méthodologie proposée est une approche intégrant trois indicateurs de résilience appliqués à l'étude de cas d'Avignon (Région Provence Alpes Côte d'Azur). Cet article développe et approfondit la méthodologie amorcée dans le premier article. Après avoir exposé les difficultés auxquelles est confrontée la région PACA et le territoire d'Avignon, l'article développe la méthodologie construite autour d'un index de résilience et de trois indicateurs afin de définir et mesurer la résilience urbaine à l'échelle local d'Avignon. L'article propose une analyse de résilience selon un continuum, une approche sur le long terme afin de comprendre les fragilités intrinsèques du territoire. Il se démarque des recherches préexistantes sur la résilience en cherchant à intégrer la plupart des complexités et des dynamiques d'un territoire urbain.

Rôle	Auteurs
Conceptualisation	Damien Serre / Charlotte Heinzlef
Méthodologie	Charlotte Heinzlef
Investigation	Charlotte Heinzlef
Ecriture	Charlotte Heinzlef
Supervision	Damien Serre, Vincent Becue
Administration du projet	Damien Serre, Vincent Becue

Safety Science 118 (2019) 181–193

Contents lists available at ScienceDirect

Safety Science

journal homepage: www.elsevier.com/locate/safety

Operationalizing urban resilience to floods in embanked territories – Application in Avignon, Provence Alpes Côte d'azur region

Charlotte Heinzlef[a,b,*], Vincent Becue[b], Damien Serre[c]

[a] UMR 7300 ESPACE – University of Avignon, 74, rue Louis Pasteur. Case 19, 84029 Avignon Cedex 1, France
[b] University of Mons, Faculty of Architecture and Urban Planning, Rue d'Havré 88, 7000 Mons, Belgium
[c] EIO – Ecosystèmes Insulaires Océaniens (UMR 241), Universiy of French Polynesia, Punaauia – B.P. 6570, 98702 Faa'a, Tahiti, French Polynesia

ARTICLE INFO

Keywords:
Urban floods
Urban resilience
Climate change
Decision-support tool

ABSTRACT

Over-urbanization coupled with a climate change has led to an increase in urban floods, both in frequency and intensity. Faced with growing uncertainties, managers are struggling to find appropriate risk management strategies. Alongside traditional risk management strategies, the concept of Urban Resilience is embedded in political discourses, international and local strategies. However, this concept remains still very abstract for a lot of actors, a buzzword difficult to operationalize. The objective of this work is to concretize urban resilience to floods by proposing a spatial decision support tool co-built with urban managers. The proposed methodology is a holistic approach integrating three indicators of resilience applied to the Avignon case study (Provence Alpes Côte d'Azur Region).

1. Introduction: An increase in floods in urban areas

1.1. Urban floods

The current context of climate change, leading to an increase in natural disasters of about 2%/year over the past fifteen years (Catastrophes Naturelles-Observatoire permanent des catastrophes naturelles et des risques naturels, 2016), associated with the increase in people and goods in urban areas, has considerably weakened cities. Among these disasters, flood risk seems to be the most problematic (Vinet, 2010), constituting 47% of climate-related disasters over the period 1995–2015 (UNISDR and Center for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), 2015).

In total, the EM-DAT (Emergency Events Database) recorded an average of 318 natural disasters in 2017, affecting 122 countries. While the number of deaths in developed countries has decreased in response to this risk, 2017 is the second most costly year (Center for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), 2018). Regarding risks, floods are still the most expensive natural disaster, which could reach 100 billion euros/year by the end of the century (Barroca et al., 2013) in Europe. This is mainly due to the increasing concentration of goods and people in urban areas.

1.2. An increased urban population

This accelerated mutation (Beaud, 2000) has led humanity to reach 7.55 billions of people. This increasing mainly urban population, 50% of people living in urban areas (Serre, 2016; Zevenbergen et al., 2010), is problematic related to the risk of flooding in the city. The rapidity of this phenomenon, urban areas having increased from 10% in the 90 s to 50% in only two decades (Meerow et al., 2016), weakens the territory because cities are not prepared or equipped to handle the needs of such a concentration of population. This, for lack of available land space, is coming to settle in areas at risk (Barroca et al., 2006). Thus, one disaster out of three concerns cities with more than 500,000 inhabitants (Dauphiné and Provitolo, 2013). What can we do when in France, ¼ of inhabitants and 1/3 of employments are settled in flood areas? (Gonzva et al., 2015) This urban growth is poorly controlled and contained by local developers and politicians. New neighbourhoods are emerging, with no adequate equipment, in risky areas such as flood-prone, polluted, unhealthy areas. With cities occupying only 1% of the world's territory (Dauphiné and Provitolo, 2013), developed countries have never concentrated more value per square kilometer (Albouy, 2002) than at present. This concentration of population on such a small portion of the territory has increased the spatial and social vulnerability via the exposure of the stakes (Adger and Brooks, 2003). Indeed, it seems logical to consider that the more a population and its stakes are concentrated on a small area, the greater the damage will be. A flood in an

* Corresponding author at: UMR 7300 ESPACE – University of Avignon, 74, rue Louis Pasteur. Case 19, 84029 Avignon Cedex 1, France.
E-mail addresses: charlotte.heinzlef@univ-avignon.fr (C. Heinzlef), Vincent.becue@umons.ac.be (V. Becue), Damien.serre@upf.pf (D. Serre).

https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.05.003
Received 15 September 2018; Received in revised form 4 February 2019; Accepted 6 May 2019
0925-7535/ © 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved.

uninhabited area will not be considered and apprehended in the same way as in an urban area (Mitchell, 1999). It is no longer just natural disasters that impact cities, but urbanization that leads to over-vulnerability, an anthropic vulnerability (Pidgeon and O'Leary, 2000), leading to a melting pot of opportunities for risk amplification (Mitchell, 1999). Urban risk is therefore composed by vulnerability and exposure (Cardona et al., 2012) such as urban concentration which is therefore seen as an aggravating factor in risk management. If we take the example of the 2001 attacks, only 1% of buildings in New York were destroyed (Dauphiné and Provitolo, 2013) while human losses were very heavy because of the high density. This density also complicates emergency services, which may be hindered by the over-occupation of the territory. In these urban spaces we observe the increase in natural risks but also the creation of new forms of risk (Mitchell, 1999; Reghezza, 2006). The interconnected architecture of economic, social, political, commercial, administrative, etc. activities in modern cities and a globalized world tend to create an interdependence of networks (Helbing, 2013), whether formal (technical networks) or informal (social interrelations). The most frequently cited example is the 2005 disaster in New Orleans (Pescaroli and Kelman, 2017), following the passage of Hurricane Katrina in August 2005 (Kelman, 2007). The hurricane and the storm wave have resulted in 1833 fatalities. Because of the interdependent networks, secondary events have occurred such as the destruction of vital utility networks, the creation and diffusion of pollution and the loss of strategic areas (Moynihan, 2009). The return to normal has been extremely complicated, particularly because many services had been destroyed such as electricity services (3 million citizens without electricity for several weeks), transport networks (reducing the capacity to deliver food), communication networks (3 million customers without phone), but also critical infrastructures such as emergency services and hospitals, leaving hundreds persons without basic supplies (Knabb et al., 2005). In this case, it is not only a natural hazard that has occurred, but a natural hazard that impacted an anthropic reality and vulnerability, because of an interdependent urban world and activities. The interdependence then plays the role of a risk diffusion factor. According to the concept of the cascading effect (Nones and Pescaroli, 2016; Pescaroli and Kelman, 2017; Pescaroli and Nones, 2016; Serre and Heinzlef, 2018) that is to say a chain reaction causing impacts in one territory, some areas are affected by the flood, even if they were not located directly in the risk zone. Networks then act as vectors of risk propagation (Lhomme et al., 2013). Societies and systemic territories are therefore deeply vulnerable to potential functional disruptions due to a crisis (Boin and McConnell, 2007). Thus, if natural hazards persist (earthquake, flood, hurricane, avalanche, etc.), it is transformed by a social hybridization (Reghezza, 2006), by the actions and practices of man on its environment. The hazard is then modified by urban practices, urbanizations, and citizens (Ale, 2005; Reghezza, 2006). Thus, while natural hazards are not new, their impacts are evolving due to urban movements, urban growth and urban structural changes (Reghezza, 2006). Faced with this rapid urbanization and the emergence of these new risks, managers have to manage a series of uncertainties (Steen and Aven, 2011). These uncertainties, linked to climate change (Adger and Brooks, 2003; Gonzva, 2017), to urbanization, to the complexity of the systems (Lhomme et al., 2013), to the emergence of new actors and new risks, complicate the management of urban risks. Faced with these increased uncertainties (Gersonius et al., 2013), the answers provided by scientists and managers are also in transition. Formerly risk-oriented management (Dobson et al., 2016), it tends today to integrate the concepts of vulnerability and resilience, taking more into account the systemic aspect of a territory.

The goal of this paper is to defend the theory that the vulnerability concept may have some limitations, both on the theoretical field and practical strategies, whereas the resilient concept is more adapted to a visionary policy approach (Serre and Heinzlef, 2018). We will define in a first part the conceptual resilience concept and its limitations in concrete applications. In a second part, we will describe how we designed a resilient decision support tool, thanks to a research-scientist collaboration and managers of the territory, with a localized application in Avignon.

2. Resilience, an urban flood management concept

2.1. Definitions of resilience

For the past twenty years, the resilience concept has been the showpiece of risk management. However, its multidisciplinary use makes it a polysemic concept. Michel Rutter is comparing it to a new Rorchach test that would allow different actors to project their interpretations (Ionescu, 2012), and transform it into a buzzword (Davoudi et al., 2012; Shaw et al., 2014; Weichselgartner and Kelman, 2015). From the Latin word *resilientia* (*re*, back; *salire*, jump), the term resilience is used for the first time by Francis Bacon in his latest work, *Sylva Sylvarum or Natural History*, to describe the 'bouncing' noise made by the echo. The first meaning, given by the English language, of the word resilience thus means "to rebound", "to recover". Formerly used it in the physical field, then in the psychiatric field, the resilience concept is defined by Holling as the capacity of an (eco)system to absorb disturbances, to recover after a major disruption and to restart activities (Holling, 1973). Adapted to risk management, resilience can be defined as "the ability of a system, community or society exposed to hazards to resist, absorb, accommodate to and recover from the effects of a hazard in a timely and efficient manner (…). The resilience of a community in respect to potential hazard events is determined by the degree to which the community has the necessary resources and is capable of organizing itself both prior to and during times of need" (UNISDR-United Nations International Strategy for Disaster Reduction, 2009). The resilience concept highlights the idea that disturbance is not necessarily negative but on the contrary is fully involved in creating a new model by supporting the idea of innovation, learning, rebound and change (Folke, 2006). The distorted system must be able to evolve, adapt (Bahadur et al., 2010; Carpenter et al., 2001; Folke et al., 2010), recover from (The Rockefeller Foundation, 2015), absorb changes (Chelleri, 2012; Gunderson and Holling, 2002) and persist. It is therefore a proactive capacity that the system has to develop in order to react in the face of the flood, developing learning ability (Vale and Campanella, 2005; Zevenbergen, 2016; Fuchs and Thaler, 2018) and anticipation abilities (National Academies (U.S.), 2012).

2.2. Theoretical position

The resilience concept can operate at different temporal scales, usually following the different steps of a disaster (Fuchs and Thaler, 2018). Some authors consider that resilience approach must be done after a shock, evaluating the resilient components post-crisis (Saunders and Becker, 2015). However, some studies emphasize the idea that resilience must be considered as a *continuum*, beginning by a preimpact phase (including preparation strategies) and going to a post-impact phase (mitigation measures) (Fuchs and Thaler, 2018). This study considers that resilience is a process inherent to the internal system functioning (Serre and Heinzlef, 2018). Therefore there is no need for a shock to express system's resilience, this capacity (or capability (Provitolo, 2012)) could be pre-existing a crisis. Resilience characteristics can exist and be identified a-chronically and constitute a potential for resilience. Resilience is therefore considered as pre-existing (Fig. 1) or developing characteristics in such a way as to make the system flexible, adaptable, elastic in the face of shock, so as to prepare, survive and redevelop an activity after the crisis by learning from failures or successes. This scientific positioning makes possible to analyze urban resilience as a continuum (Fig. 1), highlighting proactive capacities that the urban system must develop in order to (re)act in the face of the disaster, thereby developing learning and anticipation skills. Resilience is therefore no longer a skill that can be observed only after the crisis,

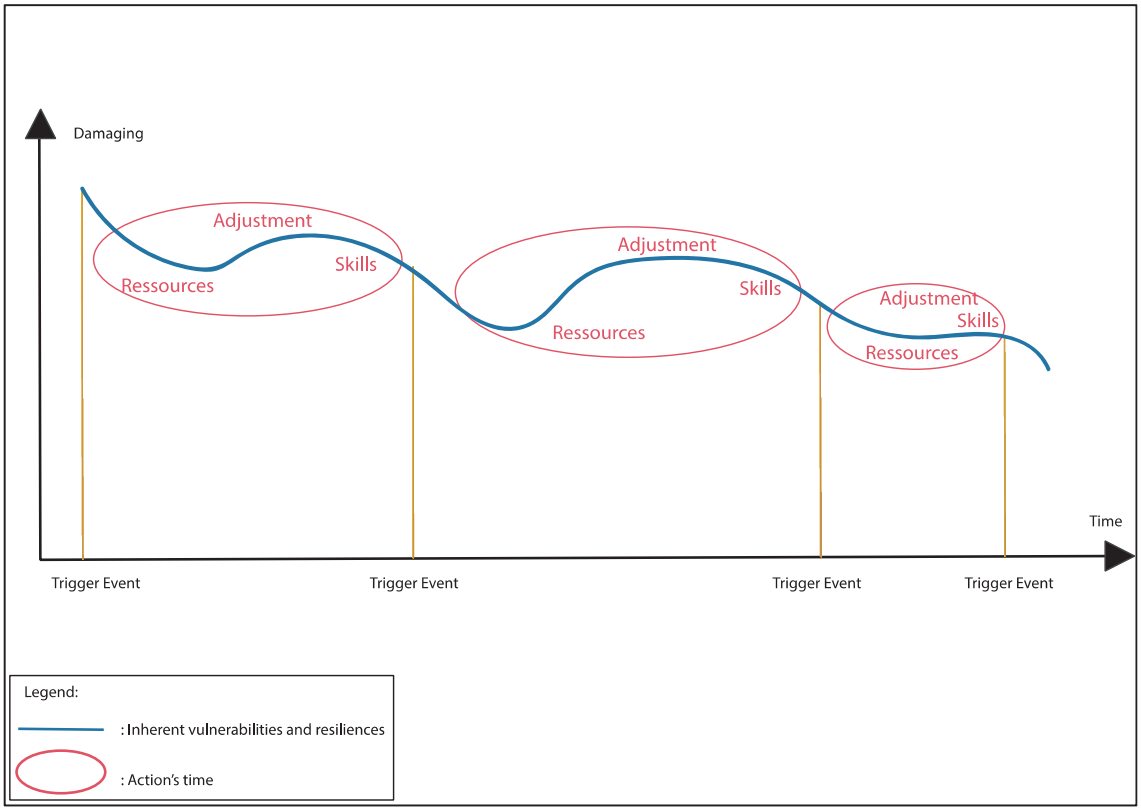

Fig. 1. Resilience process on a long term.

but rather a concept that would define a learning process (Brand and Jax, 2007; Davidson-Hunt and Berkes, 2002; Gunderson and Holling, 2002) via a culture of risk (Laganier, 2015) over the long period of time during which the shock would only be a trigger and reveal the intrinsic capacities of the system. From this point of view, resilience and vulnerability are no longer in opposition but participate in the definition of the inherent characteristics of the systems. The shock will then make it possible to highlight these resiliences and/or these vulnerabilities. Nevertheless, these characteristics can be revealed by the shock. Resilience factors can then be identified a-chronically, over a long time in order to study and develop resilience potentials (Reghezza-Zitt et al., 2012; Serre and Heinzlef, 2018). Resilience always refers to a return to an acceptable balance, whether pre-existing or new.

This concept refers to technical, urban, architectural, political, economic, social, management, environmental innovations in order to (re)question our risk management systems and approaches. This injunction to innovation perfectly suits our complex and evolutive urban world. Nevertheless, and despite a significant increase of the resilience concept (Meerow et al., 2016) in urban risk management, concrete advances still have to be made. Perhaps due to its over-use (Fuchs and Thaler, 2018; Weichselgartner and Kelman, 2015), few practical integration of this theoretical concept have been made (Klein et al., 2003). Furthermore, the majority of nowadays' studies are essentially turned around a technical-organizational resilience (Koks et al., 2015; Lhomme et al., 2013; Serre, 2016; Toubin et al., 2015; Bozza et al., 2018) but without taking into account its social dimension. The goal of this research is to reconcile urban, technical and social resilience by facilitating the understanding of this concept and more precisely its integration in urban planning policies and urban risk management. To operationalize resilience, this work is aiming at co-creating a spatial decision support tool with urban managers in order to integrate the theoretical concept into urban practices and flood risk management policies.

3. Measuring and mapping urban resilience to floods

3.1. State of the art

Several researchers have attempted to calculate the propensity of a society and/or territory to experience shock, and its intrinsic abilities to recover. Cutter revolutionized social vulnerability by creating its index – SoVI – to examine the spatial distributions of social vulnerability to natural disasters. Its application, tested on the US territory, is intended primarily for an audience of territorial managers to improve planning practices. Indicators have been categorized into social resilience, economic resilience, institutional resilience, resilience infrastructure and community capital, to provide a global view of social and spatial interactions. Following this data, a global vulnerability map was produced in the US, with high social vulnerability (over 20%), moderate social vulnerability, and low social vulnerability (less than 20%) (Cutter and Finch, 2008).

More recently, Norwegian researchers have developed a natural hazard vulnerability indicator for Norway (Opach and Rød, 2013). This indicator stems from the realization that urban designers have difficulties in territorializing vulnerability in terms of space and population. Their tool, ViewExposed, has integrated various hazards present on the territory of Norway, floods, landslides, storms and avalanches. To quantify this vulnerability of territories and populations to the risks, the scientists worked on the "integrated vulnerability" (IntVI), the linking of the exposure to a risk and the capacity of the local populations to resist it. In addition to the exposure index, social vulnerability was taken into account, with various sub-indicators, socio-economic vulnerability (unemployment and demographic trends, viability of the municipality, socio-economic status, qualifications, etc.) and the vulnerability of the built environment (lifelines, aging of buildings, density of facilities). This tool was designed for a public of professionals, local elected officials but also for the local populations.

While these tools have been designed around the concept of

vulnerability, others address resilience in order to map it. These works are valuable avenues for reflection to work on the implementation of the concept of resilience on the territory. However, this analysis of urban resilience is essentially based on the technico-organizational prism (Toubin, 2014). A functional study of the city to measure or improve its resilience often seems to be the most obvious. Because of their broadcasting capacity, networks are regularly subjected to this analysis. A case study in Dublin was carried out with the aim of developing a GIS prototype to analyze different characteristics of resilience, the absorption capacity (i.e. the capacity of a network to function in spite of events disruptive), recovery capacity (i.e. the ability of a network to return to service as quickly as possible) and lastly resilience (Lhomme et al., 2013). The objective was to facilitate the integration of the theoretical concept with the managers' practices. The final mapping classifies the city into different areas of resilience, depending on their ability to return to service after the crisis.

More systematically, Suarez has devised a global index to measure the spatial resilience of a territory, with indicators as diverse as modularity, tightness of feedbacks, social cohesion, innovation and organizational diversity (Suárez et al., 2016). Most of the indicators that have been defined are composed of a social, economic, institutional and physical dimension.

These studies work at the urban scale of the city and / or agglomeration, but some researches have chosen to study buildings to measure potential resilience. Nguyen focused on measuring the resilience of households to floods by asking people about their homes based on architectural and material characteristics (Nguyen and James, 2013). This methodology has been reused and deepened in Norway to create a guide on how to prepare for climate and weather events that may affect individual homes based on building and geographic characteristics (Johansson et al., 2016).

Although important for our research, these studies highlight the limitations of a vulnerability/resilience approach. Each of these studies highlighted the difficulty of jointly studying the vulnerability and resilience intrinsic to territories and urban populations. Moreover, among these few lines of thought cited, key examples in this work, many are essentially turned around a technico-organizational resilience, without taking into consideration its social dimension. The objective is therefore to facilitate the understanding of the notion of resilience, and especially its integration into management and planning policies, at the crossroads of urban, technical and social resilience. This work aims to operationalize resilience by creating a spatial decision support tool that integrates the theoretical concept into urban practices and flood risk management policies. Through its joint construction with urban services, as well as through its holistic approach, this work seeks to combine the different approaches already established, while deepening the concept of resilience by studying these components at once social, technical and urban.

The objective of this work is therefore to address resilience in all its complexity, in all the components that make up the territory, to operationalize it through spatial mapping, but also to measure the impact of new urban projects on territorial resilience. The proposed work is therefore carried out at two scales, the spatial scale of a city and the scale of the urban project (Balsells et al., 2015), in order to concretize the international injunctions of resilience (The Rockefeller Foundation, 2015).

3.2. A Holistic methodology for resilience to floods assessment

3.2.1. Resilience indicator modelling

Our research highlights the idea that the resilience approach must be concentrated on both multiple social and territorial dimensions and interactions. Our goal is to understand and to point out the characteristics which could decrease or increase urban resilience. Bearing in mind that resilience is considered as an ability, a capability of a society or a territory to plan for, adapt, absorb, recover from, learn, evolve, we tried to select some inherent traits which would participate to develop a resilience territory.

Over the last decade, the use of indicators has been increasingly developed in risk management as they may measure or/and operationalize variable to describe an extraordinary phenomenon (Øien, 2001). Indicators are valued because of their ability to integrate large amounts of information in an easily understandable form, making them valuable communication tools and instruments of action (Freudenberg, 2003). They can assume different kind of functions, simplify the data without losing sight of the role they play as an important communication tool specifically for policy making and public communication (Cutter et al., 2010). In this research, we developed several indicators, themselves divided into specific variables, in order to study both inherent vulnerabilities and resilient characteristics of a society and a territory. It is established here that these variables indicate a potential for resilience in order to revive a social, economic, urban, and systemic activity after a shock. These indicators have been built after a translation of the Baseline Resilience Indicators for Communities (BRIC) methodology (Cutter et al., 2008; Singh-Peterson et al., 2014) and constitute a hierarchical resilient index (Tate, 2012) constructed on the basis of three indicators of urban, social, technical resilience (Fig. 2), a city being composed by populations, networks, environment, infrastructures, buildings etc. (Lhomme et al., 2010).

(a) *Social resilience*

It is maybe the most sensitive indicator. Social resilience can be defined as the capacity of a population to adapt and recover from

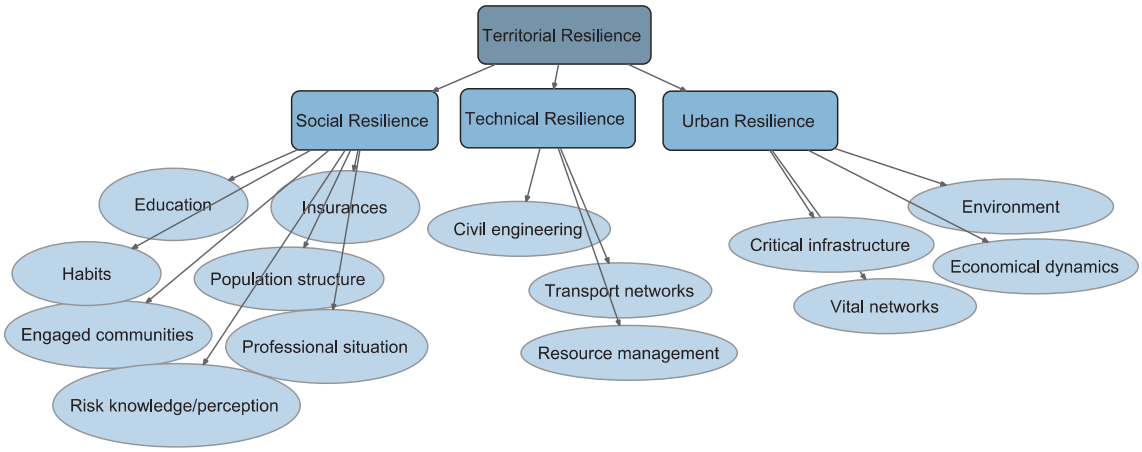

Fig. 2. Resilient hierarchical index.

disturbances (Hutter and Lorenz, 2018). Many factors can allow a social entity to proactively act, react and redevelop activities or interactions, such as the age (Cutter et al., 2010), the political investment (The Rockefeller Foundation, 2015; Voss, 2008), the socioeconomic status (Flanagan et al., 2011), the risk knowledge and perception, diversity etc. We understand in this study social resilience as a social community resilience (Wilson, 2013) and not individual resilience (Hutter and Lorenz, 2018). Following the Bourdieu's conception, we consider that social resilience is a multiple concept, based on few variables as personal dispositions and habits, knowledge and perception and educational qualification (Bourdieu, 1984). The main idea is to pay more attention to the capacities, capabilities and resources of a population in order to proactively adapt components to a potential disturbance (Hutter and Lorenz, 2018; Serre and Heinzlef, 2018). We should not forget that population revitalizes territory after a crisis, and that social resilience may create the difference between vulnerability and resilience (Hutter and Lorenz, 2018).

(b) *Technical resilience*

We understand as technical variables all the material components interconnected such as urban networks. Transport, gas, electricity, water networks (their age, their ability to resist, absorb, recover from (Serre, 2016) are integrated into this indicator). Indeed, recent researches highlight the impact (negative or/and positive) of the urban networks during and after a crisis. They are essential to the good functioning of a city, connecting more and more people and territories and, in this way, offering a variety of resources and opportunities but they also may create interdependence situations (Serre and Heinzlef, 2018). They may, by their interconnection characteristics, propagate the floods beyond geographical and functional border (Boin and McConnell, 2007), and by this way, the failure (Lhomme et al., 2010). Although they are essential to create dynamics, relationships, opportunities, they also create vulnerability on a territory. One single failure may create cascading effects affecting the whole city, because of the reticular urban system (Serre and Heinzlef, 2018). For this indicator, we developed the methodology of the DS3 Model (Serre, 2018), which defined three characteristics to analyze the resilience of urban networks: resistance, absorption and recovery capacities.

(c) *Urban resilience*

We consider that the urban resilience indicator includes all urban dynamics – physical such as buildings (age of buildings, density, functionality) or critical infrastructure - or virtual dynamics such as economic dynamics, evaluated by the creation or disappearance of new commercial properties. For instance, for the critical infrastructures, we measure their influence of the field of action. Critical infrastructure can be defined as the infrastructure which concentrates all the functions which are necessary for the good functioning of a territory and its population (Pescaroli and Kelman, 2017). They are defined "critical" because in a situation of crisis, their potential destruction could weaken all the organization of a territory (Galland, 2010). They may be natural (water supply for instance), built (energy, telecommunication, transport networks, etc.) or virtual (cyber information for example) (Serre, 2018), but none exhaustive list exists. However, they are part of the territory and hence are a precondition to develop methods to assess resilience (Brauner et al., 2018).

We established few variables to understand the urban resilience degree, taking into account critical infrastructures (fire, police, defense forces) influence area, the health access (Norris et al., 2008; Opach and Rød, 2013), the density of social housing (Johansson et al., 2016), the touristic dynamic (Tierney, 2009) and the economic dynamic (creating new companies, keeping old ones).

3.2.2. Turning the concept of resilience into practice

Because of its multiple origin (Alexander, 2013) and its multiple use across disciplines, resilience still struggles today to become clear, operational and part of practical strategies (Weichselgartner and Kelman, 2015). Because of its multiple levels of meaning, interpretation and definition, measure resilience is an important challenge and led to a very little attention from scientific studies to the need of resilience operational indicators (Carpenter et al., 2001). Most of the research that tends to define resilience is based on technical approaches (Lhomme et al., 2013; Serre, 2018, p. 3), particularly around networks and/or critical infrastructures. This is why this research focuses on the need to understand urban resilience in its entirety, in order to understand all the potential resilience of each element that contributes to the construction of the territory, through a precise definition of variables, indicators and treatments that can be reproduced by local actors.

The variables of each indicator were based on an analysis of a scientific review in order to analyze the different social (age of the population, level of education, knowledge of risk, etc.), urban (urban structure, economic dynamics, state of structures, etc.) and technical elements which participate in the territory's reality. Thanks to the indicators' methodology, it is possible to explore social, urban, technical phenomena and to determine which area is more or less resilient by a comparative work.

Once the selection indicators work has be done (Fig. 3), we chose to use Open Data in order to make this methodology as generic as possible. By this way, the approach will be "unsurpervised" (Jovanovic et al., 2018) and reproductible. 90% of the data set is from INSEE or SIREN, French open data website, and 10% are sensitive data from the case study's territory.

In order to calculate resilience, we chose to study the impact of each variable on overall resilience, as each variable can have a negative or positive effect. What determines this impact is the ratio of the variable to the overall data. As an example, if there is a high rate of houses built between 1970 and 1994 compared to the total of built houses at the IRIS scale, the impact will be negative because such houses are, for instance, more vulnerable to damages and likely economic losses. (Mileti, 1999). For each variable established, we therefore estimated the impact it would have on overall resilience (Cutter et al., 2010). All raw data acquired via INSEE were therefore transformed into comparable ratios using percentages. This standardization was essential to avoid the problems inherent in pooling different units of measurement, since our variables were delineated in a number of statistical units, ranges and scales. Our results ranged from -1 to 1. Once these ratios were calculated, it was necessary to determine their impact on overall resilience. Does this variable have a positive or negative impact on resilience? It was also necessary to consider the potential impact changes depending on the timing of a flood. Usually, scientific studies calculate variables with a linear min-max scaling, a X-min/max-min type (Cutter et al., 2010). But as we wanted to compare several years, analyze the impact of each variable on the global resilience and vary the overall value of the resilience per indicator, we have chosen to use linear regression for several reasons:

- First, linear regression introduces the hypothesis that the values of Y depend on those of X, i.e., assume that knowledge of the values of X predicts the values of Y. We knew the value of the ratio (i.e. the value of the variable), we had to determine the value of resilience. It is therefore a forecasting model and the objective is to minimize the forecast error, i.e. the distance between the observed values Yi and the values Y*i estimated by the relation X + b. This choice also makes it possible to estimate the effect of one or more variables on another by controlling for a set of factors. For example, in educational science, the effect of class size on children's academic performance can be assessed by controlling by the socio-professional category of the parents or by the location of the school. Under certain restrictive assumptions, this effect can be considered as a causal effect. Adapted to resilience, we can therefore determine the effect of the value of the variable (for example

Fig. 3. Resilience flow chart – from theory to practice approach.

the value of the number of people aged 25 to 39), on a potential overall resilience. Indeed, in statistical learning, linear regression is considered a supervised learning method used to predict a quantitative variable.

-Second, the visualization, thanks to the resilient curves, helps into the decision-support process. Indeed, the use of curves graphically expresses the vertical variation of the line for a horizontal displacement of a positive unit.

Therefore, in order to calculate the resilience, we made the choice to use a linear equation of type X + b. The regression line of Y as a function of X introduces the hypothesis that the values of Y depend on those of X, that is to say postulate that the knowledge of the values of X makes it possible to predict the values of Y. It is therefore a forecasting model and the objective is to minimize the forecast error, i.e. the distance between the observed values Yi and the values Y * i estimated by the relation Y * = aX + b. In this case, y = resilience indicator and X = resilience variable. It is said that the variable Y is the dependent variable or variable explained and that variable X is the explanatory variable. The values of X represent a resilience curve, with X0 = resi0 and X1 = resi 100 which evolve depending on the positive or negative impact of the variable on resilience. These values make it possible to situate the variable on a growth curve or of a decrease in growth. The resi 0 corresponds to the starting point of the curve and the resi 100 to its point of arrival. Each variable is therefore placed on a positive or negative curve, following its impact on the territorial resilience. For example, if we take the proportion of young people in the territory, if this variable is higher than the old people (older than 65 years old for example (Cutter et al., 2014)), we consider that they will be more resilient. Therefore, we can conclude that this variable will increase the global resilience. This definition of the parameters corresponds to a unique form of deviation for each variable, thus making it possible to vary the overall value of the resilience per indicator. This choice can be explained by the will of analyze resilience in a multi-year comparison and an approach using Min and Max (Cutter et al., 2010) (which would not have been similar from one year to another), wouldn't be valid. If the value of the resilience curves is different for each variable, the weighting is 1 for all variables (Holand et al., 2011). This choice of single weighting is explained by the desire to avoid disparities between the variables (Fekete, 2009), some of them being sensitive and subjective (% of foreign people, level of education, etc.).

3.2.3. Spatial and temporal scales

Spatial and temporal scales have an essential role to play into the

measure of resilience (Emrich and Tobin, 2018). Indeed, in a interdependent world context, risks have exceeded their previous geographical and temporal limits and therefore become transboundary catastrophes (Ansell et al., 2010; Pescaroli and Alexander, 2016). This new risks, systemic risks, don't have statistically independent failure anymore but, in the contrary, have interdependent failures because of the interconnected system components. In this case, a localized failure could have unimaginable and potentially disastrous effects and unbounded damages (Helbing, 2013). Indeed, a flood will impact its local territory (major riverbed for instance), but because of the interconnected networks or urban activities, it may exceed the physical limits of the floodplain area. For example, an indirect financial impact (Ansell et al., 2010) of a flood in Paris could impact international relations with New York, for example, on a global scale. A modern crisis is also over classical time dimensions. The terrorist attack on US soil in 2001 is a good example to understand the crisis effects felt on several years at different levels (financial, political, social crisis). A single crisis, composed of several sub-elements, can therefore have effects that can appear at different time scales. In order to integrate this specificity of modern disasters, we have established an analysis with a precise geographical and temporal limit. The spatial scale of analysis is local (Robinson and Carson, 2016) as this scale is easier to work with local actors in order to precisely answer their problems of management facing the risk of flooding. Thus, urban projects at the neighbourhood or macro-lot levels will be analysed in terms of their contribution to the intrinsic resilience of the neighbourhood. This scale of neighbourhood or urban project, so far little practiced (Balsells et al., 2015) allows to act directly on the territory, to innovate and to experiment new urban risk strategies. As a result, the main scale of study chosen to assess urban resilience is as accurate as possible, i.e. at the IRIS scale. This scale is located between the 200 × 200 grid (INSEE) and the District Council. Each computation is therefore multi-scalar but also multi-temporal. As the disaster is limited to a specific temporality, with a beginning and an end (Jigyasu, 2005), resilience risk management has to integrate the temporal reality. Indeed, the resilience to risks must be imagined according to a multi-temporal paradigm, to act before the crisis, i.e. to anticipate (urban planning); and to recover from the event (to rebuild, to restore an activity, to adapt) as a continuum (Emrich and Tobin, 2018; Serre and Heinzlef, 2018).

3.3. Avignon pilot site

As we said, we wanted to operationalize urban resilience to a local scale, in order to make this concept clearer and easier to use. Concrete work on resilience cannot be envisaged without a specific study area and subject to the risk of flooding. It turns out that the Provence Alpes Côte d'Azur region suffers from the consequences of flooding every year. Each event raises the question of the territorial strategy to adopt with regard to events that will be increasingly frequent and severe according to IPCC forecasts. However, elected officials, local leaders and decision-makers are sometimes powerless over the strategies of territories to be developed both in the short term and in the long term. At the same time, urbanism operations continue, without properly integrating this dimension of risk, and these operations are in fact long-term. Given the regional context linked to floods and urbanization issues, it is urgent that local decision-makers and planning professionals can therefore integrate resilience strategies into their planning choices, their urban programming choices and their architectural choices. It is therefore to respond to these tensions and uncertainties that a collaborative approach with the actors of the city of Avignon has been put in place, in order to co-construct a resilience strategy.

3.3.1. Collaborative approach to implementing resilience concept

Concrete work on resilience cannot be envisaged without a specific study area and subject to the risk of flooding. The current research project is based in the Provence-Alpes-Côte d'Azur regional area (Fig. 4) (PACA), and more precisely in Avignon (Fig. 5), city subject to flood risk (Rhône-Durance confluence). Well known for either its flash flood, usually unpredicted, fluvial flood (the unpredicted Durance river), the area is submitted to flood uncertainties.

In terms of stakes, the Preliminary Flood Risk Assessment on the Avignon Flood Risk Territory (TRI) estimates:

- about 400,000 people the permanent population in flood-prone areas (in the envelope approached potential floods) − 67% of the estimated total population of the TRI,
- and about 185,000 jobs in flood-prone areas − 76.2% of the number of jobs total identified within the TRI. (Directive Inondations Bassin Rhône-Méditerranée, 2014)

In 2010, it was estimated that in Avignon 768 inhabitants and a maximum of 606 jobs are affected in the case of a frequent flooding scenario and 73,820 inhabitants for a maximum of 72,198 jobs are affected in the case of an extreme scenario (Fig. 6) (Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL PACA), 2014). With important, but rare (the latest important one was in 2003), floods, the risk culture, the prevention strategy, the resilience operationality are questioned in Avignon.

Facing exponential physical and social issues, the City needed a decision support-tool in order to integrate and adapt the resilience concept into urban practices. This need is represented by a collaborative work, a partnership with the urban and technical services (GIS) of Avignon. The goal of collaborative approaches is to structure a complex problem in a transparent manner (Mustajoki et al., 2004) to enhance mutual understanding of stakeholders and consensus. The co-construction of expert and local knowledge can reduce complexity, take into account the interests, the needs and point of views of everyone, but also promote acceptance and appropriation of solutions to facilitate decision-making. The implementation of urban resilience as a combination of good management of resources and services, coherent urban planning and taking into account the risks and possibilities of adaptation is also part of the need to involve multiple stakeholders (Serre and Heinzlef, 2018; Toubin et al., 2015). Furthermore, the main goal of this project is to include the concept of resilience in the very beginning of any urban project and strategy. In this perspective, to build a vision co-constructed by the different actors makes more legitimate and relevant the reflection on a territory (Desthieux, 2005; Terrin, 2014). More specifically, on such a complex subject as urban floods with so many uncertainties, a collaborative approach enriches knowledge and perceptions on a complex and abstract topic and it sensitizes and motivates each person who has and will have a role to play (Toubin, 2014). These characteristics facilitate the implementation of adaptation strategies (Frommer, 2011).

In this case study, the collaboration is particularly illustrated by the exchange of so-called sensitive data, although 90% of the data are Open Data (INSEE or SIREN), and the co-construction of the tool by using a Data Management Engine (ETL), the Feature Manipulation Engine, used by the GIS service of French cities. By paying particular attention to using the same processing tool as French communities, the accessibility of the tool is reinforced, as it does not require specific learning that would lengthen access time but also considerably reduces its use. Maps and analysis are done with QGIS.

3.3.2. Main results of the case study

Preliminary resilient results illustrate a potential of resilience independently of a specific flood scenario (level of water, precise temporality, material or human losses) but following a disaster temporality – before, during and after a crisis. The indicators allow to independently map each variable and each indicator (Figs. 7 and 8), but also to condense them to create an overall index of resilience. For instance, Fig. 7 has been built thanks to social resilience variables, as populationon structure data (age of population, INSEE data); professional situation

Fig. 4. Map of the south of France, source: Géoportail.

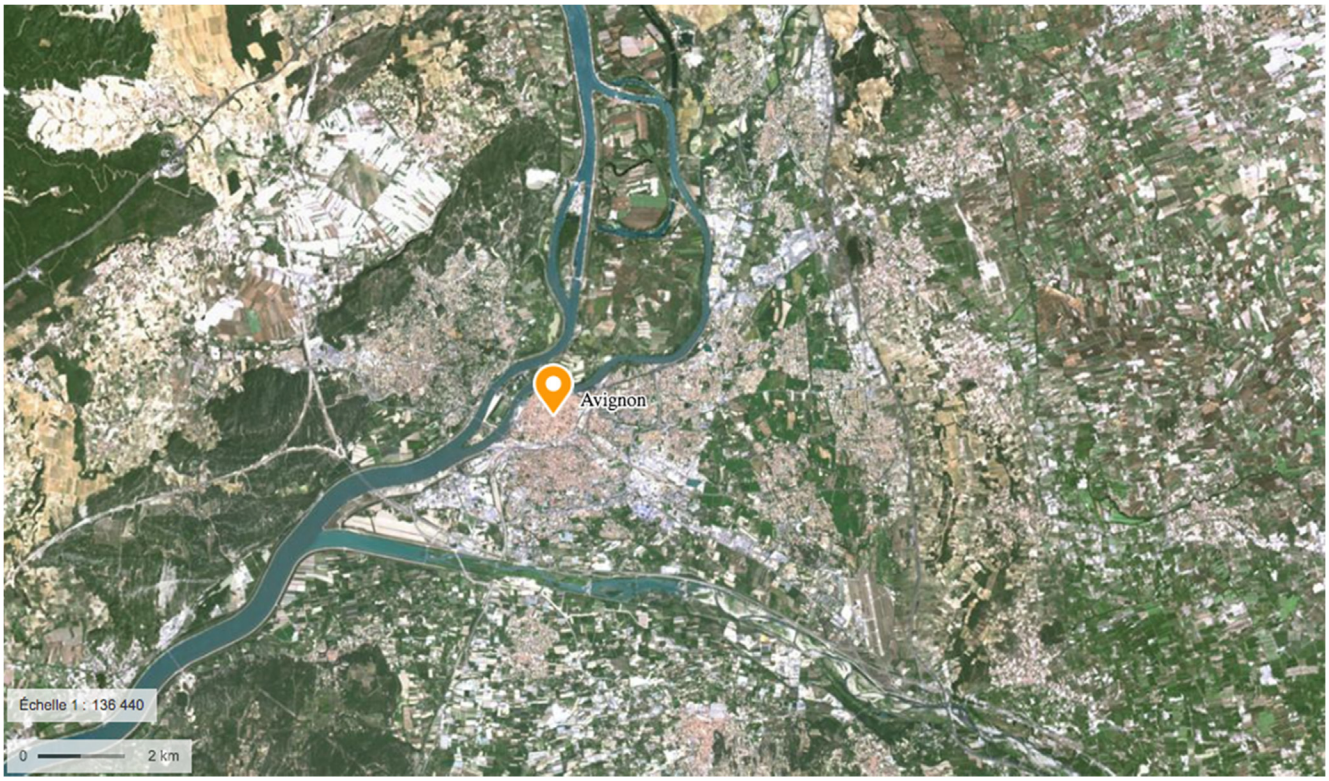

Fig. 5. Avignon's localisation, source Géoportail.

(INSEE data); habits (INSEE data); education (INSEE data), etc. These variables have been aggregated in order to map a global social resilience indicator for a scenario "during crisis". Following the same methodology, Fig. 8 has been built on urban resilience variables such as buildings' characteristics (construction date, SIREN data), location of critical infrastructures (SIREN data), economic dynamics (business creation and closure, SIREN data), etc. These variables have been also aggregated in order to map a global urban resilience indicator for a scenario "during crisis". The local scale chosen as well as this dissociation between variables and indicators makes it possible to analyze precisely the components that accentuate or diminish the resilience.

To interpret our results, we created histogram in order to analyze the statistical repartition of data (Figs. 9 and 10).

We can see that on a scenario "During Crisis", there are more than 8

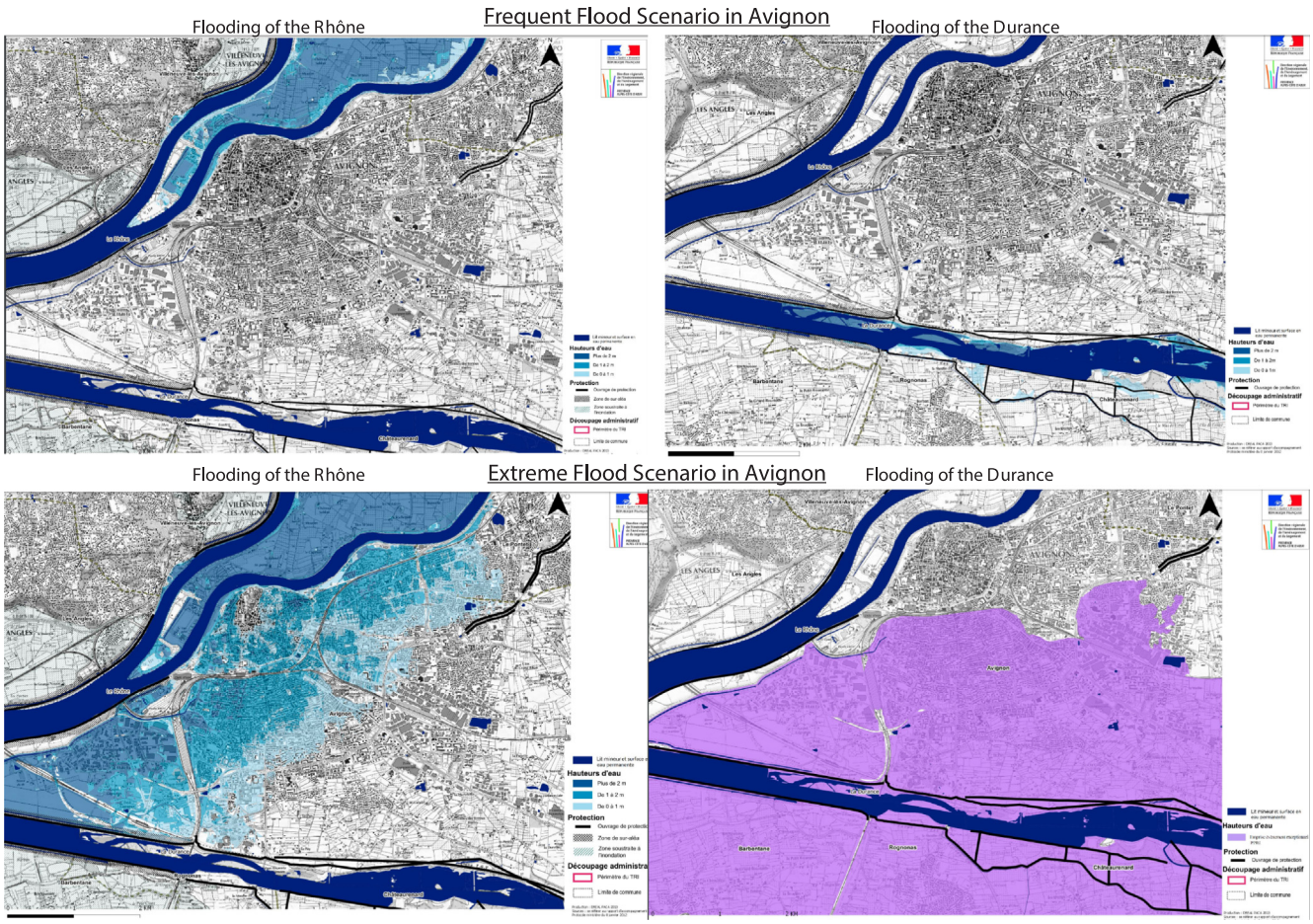

Fig. 6. Frequent and Extreme Flood Scenarios in Avignon scale, inspired by © DREAL PACA.

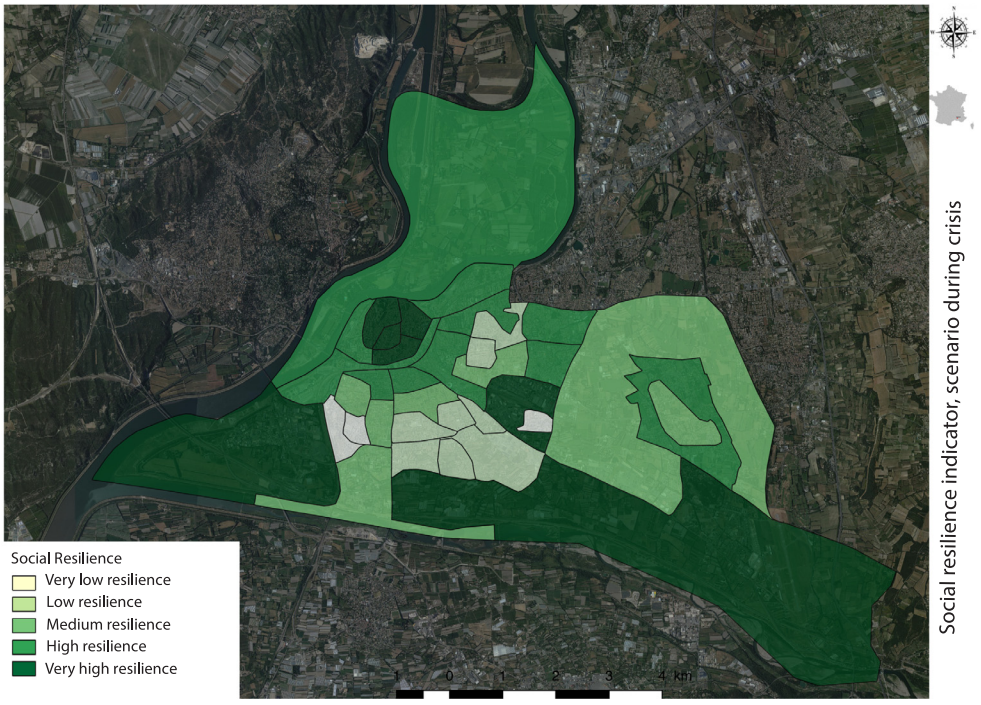

Fig. 7. Social Resilience-Scenario During flooding event.

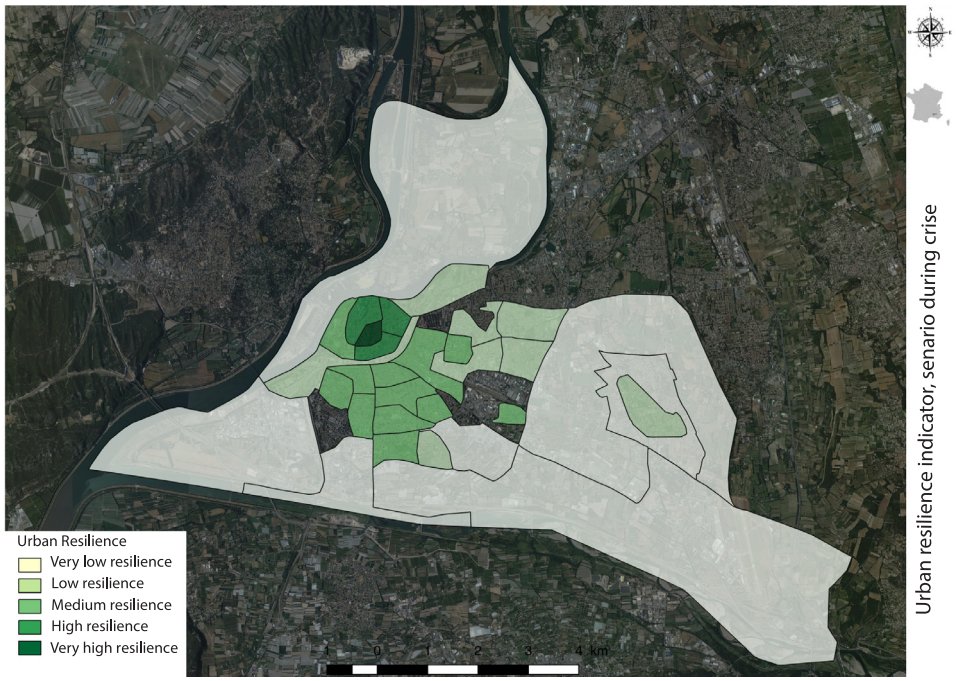

Fig. 8. Urban Resilience-Scenario During flooding event.

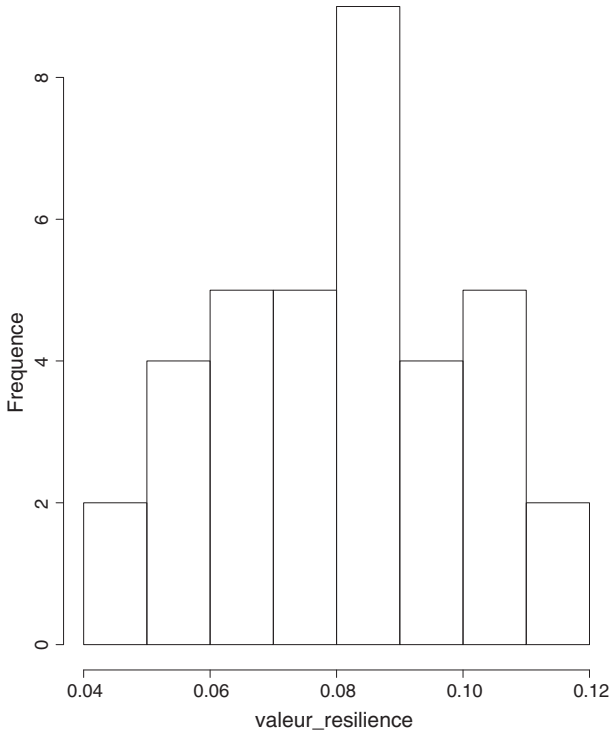

Fig. 9. Histogram Social Resilience-Scenario During Crisis – High propension of 0.08 value (high medium value of social resilience).

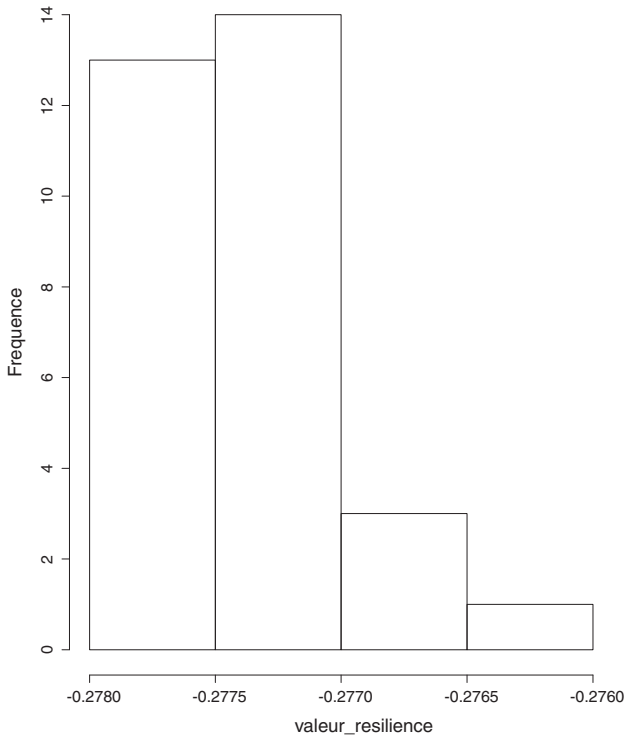

Fig. 10. Histogram Urban Resilience- Scenario During Crisis- high propension of low urban resilience value.

occurrences of the value 0,8, an average social resilience, unlike the urban resilience whose average is very low, under the step of medium resilience value. It seems that during a crisis scenario, social resilience is higher than urban resilience. These results may lead to a change of mind, of consciousness of urban managers and policy makers.

These maps are showing an objective resiliency, independently of a specific risk. Finally, with the idea of measuring the existing resilience but above all the impact of future floods on the dynamics of the city, it was interesting to locate spatial projects spatially during the period 2015–2020. These are as varied as the rehabilitation of some roads, as the creation of a tram line or new eco-neighbourhoods, but each of them participates in a structural and landscape renewal of the city. The next steps will be to apply these indicators on a smaller scale, the urban project scale, in order to advice and test these results to create a resilient urban project.

4. Discussion

The first Avignon results show that the intramural remains preserved by the flood management measures. Neighbourhoods such as Barthelasse in the North or Courtine in the South-West are both neglected, unoccupied and little connected to urban dynamics. In case of flood these neighbourhoods are vulnerable and of low priority. These results must therefore be put into perspective with the city's guidelines for urban planning by 2025. The Courtine district in particular is subject to an urban renewal project and will be our first case study. Indeed, the next step in our research is to translate the methodology into urban projects. The objective is to analyze the risk strategy taken into account by urban renewable projects. The challenge is to adapt resilience indicators built at the community level and transfer them to the urban project scale. In parallel with this step, we would like to test the holistic methodology on other cities of the PACA region, Cannes, but also on the French territory. Since 90% of the quantitative data is in Open access, it is possible to adapt this methodology to other territories, at least on all French cities, which are using INSEE data set. Thus, comparative work could lead to an exchange of feedback between different territories which could lead to a French resilience index. Furthermore, the choice of free-use tools or tools used by French collectivities makes the tool more accessible to urban services. Therefore, this methodology provides a holistic approach to analyze the resilience potential of an urban system. While the concept of resilience remains imprecise and subjective, this work allows to perceive resilience characteristics that a territory must develop.

The fact that this tool is co-constructed makes possible to directly integrate the needs and approaches of city managers. Unlike some case studies of resilience measurement (Fox-Lent et al., 2015; Serre et al., 2016, p. 3), this study does not apply its methodology *a posteriori* to a territory subject to a given risk, but starts by considering the integration of the specificities of the territory and especially its governance, a necessary step in a collaborative and participatory decision-making tool. The tool is therefore more in line with urban planners' risk practices and strategies. The concrete application on Avignon's territory underlines the feasibility and usefulness of this kind of approach regarding the growing need of communities to acquire knowledge and a concrete tool in order to better understand resilience concept. The concept of urban resilience refers to multiple, transversal and interpretative issues requiring a transdisciplinary approach that allows the different actors of the city to be integrated from the design phase to the strategies of resilience. Recognizing by this very fact that there cannot be a single and correct answer to the question of urban risks, systemic and collaborative approaches make it possible to formulate and respond to the difficulties encountered by putting into perspective the different academic and practical knowledges of the actors. Moreover, this collaborative work guarantees acceptance and appropriation of a concept that is still abstract on many points.

The fact that each indicator and variable is measurable independently of each other makes it possible to point out the limits and fragilities of the territory. As a result, it is easier to advise planners on the measures to be taken to better prepare the territory for a crisis. These results are already used within the community, the city of Avignon thus having a new database of social resilience at local scale. With these new data, the city is creating a decision support tool to influence urban renewal projects to analyze the quality of social and urban life. The combination of these results should be of interest in understanding global resilience and building a strategy to increase urban capacity to cope with floods. This methodology could support decision-making by highlighting which characteristics or programs could enhance or decrease urban resilience.

Despite the significant contributions of this research, we faced a few limitations such as the genericity of the indicator of social resilience or genericity at the international level. Indeed, if 90% of the data is in open data, 10% are composed of answers to questionnaires, or from sensitive data belonging to the community. These data being non-reproducible, two conclusions are possible. It is either possible to leave out the variables that require these sensitive data, the representativeness of the resilience could not then be the same, or it is then necessary to accompany this methodology by a permanent agreement with the partner cities. A personal investment is then the condition *sine qua non* to acquire these data. With regard to international genericity, it is necessary to study data in free circulation in each state. The quality and the ease of obtaining them can then vary.

Another limitation concerns the tool used by managers, the Feature Manipulation Engine (FME). Although used on a large scale in French communities, this tool still pays off. Our next step is to study the feasibility of creating a QGIS plugin that would directly integrate our computer script and resilience processing. The analysis, from the data transformation to the mapping of the resilience would thus be only on a tool in free circulation, free and downloading-free.

Finally, the last limit of a work that aims to clarify and operationalize resilience, as mentioned by (Bakkensen et al., 2017), is the bias in the definition and construction of measurement indicators. If there is not yet enough perspective and empirical validation when analyzing resilience over a long period of time and as a *continuum*, these studies may be more a useful screening-level tool in order to analyze, identify, resilience and vulnerability potentialities for further investigating and modelling in scientific communities than a final decision support tool for urban managers.

Although the concept of resilience is still vague and imprecise in many respects, the international work of various researchers and risk managers allows revealing characteristics that a territory must perform to improve its resilience level. This work has chosen to highlight the capacities inherent to a territory that can participate in the preparation, survival and relaunch of activities on a territory after a disaster, capacities that are declined according to the different temporalities of a flood. The study was thus able to develop an analysis adapted to the multi-temporal form of a crisis. This study should eventually make it possible to acquire a complete index on urban resilience, an index that is fully relevant to the urban needs of managers (The Rockefeller Foundation, 2015). This research also proposes a holistic methodology to improve urban resilience. It is based on a set of indicators constructed jointly by scientists and urban planners. This approach underlines the importance of having an integrated reflection on the concept of resilience, adapted to urban territorial complexity. A territory is composed of structural characteristics, buildings, interactions, environment, infrastructures, networks, economies, policies and populations. Applying the concept of resilience to urban dynamics must take into account all these elements and all the actors of a territory. Our methodology proposes to respond to this challenge by these indicators measuring inherent resilience and by collaborating with decision-makers. This research therefore highlights urban characteristics that can improve urban resilience and advises planners in their future decisions.

This research therefore proposes an integrated and holistic approach to resilience, both in the design of measurement indicators and in the collaborative approach methodology. The next lines of interest would be to apply the indicators constructed at the scale of the city to the scale of the urban project. Indeed, as mentioned in the article, the local level may be the key to integrating resilience into risk management strategies. Our next step is therefore to rework the variables of our indicators in order to apply them to the urban project scale, probably at a 200x200 grating scale. This future step would determine whether these new urban projects are contributing to the development of urban resilience, both at their own scale (or even at the neighbourhood level) and at the community level. In addition, testing the methodology in other territories (French cities such as Cannes, or internationally) would validate and generalize the methodology.

After having built a methodology as holistic as possible, the tests on the territory of Avignon proved the usefulness of an integrated and global approach. Through the interest of the community for research on

resilience, through their involvement in the exchange of data, through their socio-economic partnership and finally through the use of the very first results of the study, we can already say that the study provides interesting and relevant answers on the issue of resilience and its concrete application on flood-prone areas

5. Conclusion

This paper proposes a holistic methodology to improve urban resilience. It is based on a set of indicators built conjointly between scientists and urban planners. This approach emphasizes the importance to have an integrated reflection on the resilience concept, adapted to the urban territorial complexity. A territory is composed by structural characteristics, buildings, interactions, environment, infrastructures, networks, economies, politics, and populations. To apply a resilience concept to urban dynamics must take into account all these elements and all the stakeholders of a territory. Our methodology proposes to answer this challenge by its indicators measuring inherent resiliences and by co-working with decision-makers. This research highlights urban characteristics which may enhance urban resilience, advising urban planners in their future decisions. This research-practice partnership underlines the growing need for territories to acquire strategies and tools in order to operationalize urban resilience, but also demonstrates the feasibility and the usefulness of this kind of approach. In support of this argument, the city of Avignon already uses these new data set in order to build an urban well-being indicator. Moreover, following a request made by the Director General of Services of the city of Avignon, a demographic and social atlas of the community is ongoing, thanks to resilience data set.

To conclude, the application in Avignon attests that the tool is operational and that collaborative approaches are an essential issue to assess resilience. This research emphasizes the idea that resilience must be a part of urban planning in order to improve risk management. However, this study analyzes inherent urban resilience capabilities, without taking into account a precise water level. It would be interesting in the next steps to test and adapt it to precise water levels. Furthermore, to test this methodology on other territories, national (Cannes, France) or international (Mons, Belgium) would probably lead to an adaptation of these resilience variables. Yet, once this comparison work will be done, it would be innovative and challenging to provide a comprehensive index on urban resilience, index which makes sense in the international approaches and needs.

References

Adger, W.N., Brooks, N., 2003. Does global environmental change cause vulnerability to disaster? In: Natural Disaster and Development in a Globalizing World. London, p. 24.

Albouy, F.-X., 2002. Le temps des catastrophes. Descartes, Paris.

Ale, B.J.M., 2005. Living with risk: a management question. Reliab. Eng. Syst. Saf. 90, 196–205. https://doi.org/10.1016/j.ress.2004.10.015.

Alexander, D.E., 2013. Resilience and disaster risk reduction: an etymological journey. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 13, 2707–2716. https://doi.org/10.5194/nhess-13-2707-2013.

Ansell, C., Boin, A., Keller, A., 2010. Managing transboundary crises: identifying the building blocks of an effective response system: managing transboundary crises. J. Contingencies Crisis Manag. 18, 195–207. https://doi.org/10.1111/j.1468-5973.2010.00620.x.

Bahadur, A.V., Ibrahim, M., Tanner, T., 2010. The resilience renaissance? Unpacking of resilience for tackling climate change and disasters 45.

Bakkensen, L.A., Fox-Lent, C., Read, L.K., Linkov, I., 2017. Validating resilience and vulnerability indices in the context of natural disasters: validating resilience and vulnerability indices. Risk Anal. 37, 982–1004. https://doi.org/10.1111/risa.12677.

Balsells, M., Barroca, B., Becue, V., Serre, D., 2015. Making urban flood resilience more operational: current practice. Proc. Inst. Civ. Eng. - Water Manag. 168, 57–65. https://doi.org/10.1680/wama.14.00051.

Barroca, B., Bernardara, P., Mouchel, J.M., Hubert, G., 2006. Indicators for identification of urban flooding vulnerability. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 6, 553–561. https://doi.org/10.5194/nhess-6-553-2006.

Barroca, B., DiNardo, M., Mboumoua, I., 2013. De la vulnérabilité à la résilience: mutation ou bouleversement ? EchoGéo. https://doi.org/10.4000/echogeo.13439.

Beaud, M., 2000. Le basculement du monde: de la terre, des hommes et du capitalisme. Poche essais, La Découverte, Paris.

Boin, A., McConnell, A., 2007. Preparing for critical infrastructure breakdowns: the limits of crisis management and the need for resilience. J. Contingencies Crisis Manag. 15, 50–59.

Bourdieu, P., 1984. Distinction: A Social Critique of the Judgement of Taste. Harvard University Press, Cambridge, Mass.

Bozza, A., Asprone, D., Manfredi, G., 2018. Physical resilience. In: Vulnerability and Resilience to Natural Hazards. Cambridge University Press, Cambridge; New York, pp. 145–189.

Brand, F.S., Jax, K., 2007. Focusing the meaning(s) of resilience: resilience as a descriptive concept and a boundary object. Ecol. Soc. 12.

Brauner, F., Classen, M., Fiedrich, F., 2018. Competence as enabler of urban critical infrastructure resilience assessment. In: Urban Disaster Resilience and Security. Springer. Springer, pp. 518.

Cardona, O.-D., van Aalst, M.K., Birkmann, J., Fordham, M., McGregor, G., Perez, R., Pulwarty, R.S., Schipper, E.L.F., Sinh, B.T., Décamps, H., Keim, M., Davis, I., Ebi, K.L., Lavell, A., Mechler, R., Murray, V., Pelling, M., Pohl, J., Smith, A.-O., Thomalla, F., 2012. Determinants of risk: exposure and vulnerability. In: Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Dahe, Q. (Eds.), Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate. Change Adaptation. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 65–108. https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245.005.

Carpenter, S., Walker, B., Anderies, J.M., Abel, N., 2001. From metaphor to measurement: resilience of what to what? Ecosystems 4, 765–781. https://doi.org/10.1007/s10021-001-0045-9.

Catastrophes Naturelles-Observatoire permanent des catastrophes naturelles et des risques naturels, 2016. Bilan statistique des catastrophes naturelles survenues dans le Monde entre 2002–2015.

Center for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), 2018. Cred Crunch: Natural disasters in 2017-Lower Mortality, higher cost.

Chelleri, L., 2012. From the «Resilient City» to Urban Resilience. a review essay on understanding and integrating the resilience perspective for urban systems. Doc. Anàlisi Geogràfica 58, 287. https://doi.org/10.5565/rev/dag.175.

Cutter, S.L., Ash, K.D., Emrich, C.T., 2014. The geographies of community disaster resilience. Glob. Environ. Change 29, 65–77. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.08.005.

Cutter, S.L., Barnes, L., Berry, M., Burton, C., Evans, E., Tate, E., Webb, J., 2008. Community and Regional Resilience: Perspectives from Hazards, Disasters, and Emergency Management (Carri Research Report No. 1). Community and Regional Initiative.

Cutter, S.L., Burton, C.G., Emrich, C.T., 2010. Disaster resilience indicators for benchmarking baseline conditions. J. Homel. Secur. Emerg. Manag. 7. https://doi.org/10.2202/1547-7355.1732.

Cutter, S.L., Finch, C., 2008. Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards. Proc. Natl. Acad. Sci. 105, 2301–2306.

Dauphiné, A., Provitolo, D., 2013. Risques et catastrophes observer, spatialiser, comprendre, gérer. A. Colin, Paris.

Davidson-Hunt, I.J., Berkes, F., 2002. Nature and society through the lens of resilience: toward a human-in-ecosystem perspective. In: Berkes, F., Colding, J., Folke, C. (Eds.), Navigating Social-Ecological Systems. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 53–82. https://doi.org/10.1017/CBO9780511541957.006.

Davoudi, S., Shaw, K., Haider, L.J., Quinlan, A.E., Peterson, G.D., Wilkinson, C., Fünfgeld, H., McEvoy, D., Porter, L., Davoudi, S., 2012. Resilience: a bridging concept or a dead end? "Reframing" resilience: challenges for planning theory and practice interacting traps: resilience assessment of a pasture management system in Northern Afghanistan urban resilience: what does it mean in planning practice? Resilience as a useful concept for climate change adaptation? The politics of resilience for planning: a cautionary note: edited by Simin Davoudi and Libby Porter. Plan. Theory Pract. 13, 299–333. https://doi.org/10.1080/14649357.2012.677124.

Desthieux, G., 2005. APPROCHE SYSTÉMIQUE ET PARTICIPATIVE DU DIAGNOSTIC URBAIN. PROCESSUS DE REPRÉSENTATION COGNITIVE DU SYSTÈME URBAIN EN VUE DE L'ÉLABORATION D'INDICATEURS GÉOGRAPHIQUES. Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, Lausanne.

Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL PACA), 2014. Population et emplois impactés par les surfaces inondables par débordement de cours d'eau.

Rhône-Méditerranée, Directive Inondations Bassin, 2014. Territoire à Risque Important d'Inondation (TRI) d'Avignon - Plaine du Tricastin -. Basse Vallée de la Durance.

Dobson, M., Smith, P., Evans, H., Chatterton, J., 2016. The Holistic Integrity Test (HIT) - quantified resilience analysis. E3S Web Conf. 7, 8012. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160708012.

Emrich, C.T., Tobin, G.A., 2018. Resilience: an introduction. In: Vulnerability and Resilience to Natural Hazards. Cambridge University Press, pp. 124–144.

Fekete, A., 2009. Validation of a social vulnerability index in context to river-floods in Germany. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 9, 393–403. https://doi.org/10.5194/nhess-9-393-2009.

Flanagan, B.E., Gregory, E.W., Hallisey, E.J., Heitgerd, J.L., Lewis, B., 2011. A social vulnerability index for disaster management. J. Homel. Secur. Emerg. Manag. 8. https://doi.org/10.2202/1547-7355.1792.

Folke, C., 2006. Resilience: The emergence of a perspective for social–ecological systems analyses. Glob. Environ. Change 16, 253–267. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.04.002.

Dobson, M., Smith, P., Evans, H., Chatterton, J., 2016. The Holistic Integrity Test (HIT) - quantified resilience analysis. In: E3S Web Conf. 7, 8012. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160708012.

Fox-Lent, C., Bates, M.E., Linkov, I., 2015. A matrix approach to community resilience assessment: an illustrative case at Rockaway Peninsula. Environ. Syst. Decis. 35, 209–218. https://doi.org/10.1007/s10669-015-9555-4.

Freudenberg, M., 2003. Composite Indicators of Country Performance (OECD Science, Technology and Industry Working Papers No. 2003/16). https://doi.org/10.1787/405566708255.
Frommer, B., 2011. Climate change and the resilient society: utopia or realistic option for German regions? Nat. Hazards 58, 85–101. https://doi.org/10.1007/s11069-010-9644-0.
Fuchs, S., Thaler, T. (Eds.), 2018. Vulnerability and Resilience to Natural Hazards. Cambridge University Press, Cambridge, New York.
Galland, J.-P., 2010. Critique de la notion d'infrastructure critique. Flux 6–18.
Gersonius, B., Ashley, R., Pathirana, A., Zevenbergen, C., 2013. Climate change uncertainty: building flexibility into water and flood risk infrastructure. Clim. Change 116, 411–423. https://doi.org/10.1007/s10584-012-0494-5.
Gonzva, M., 2017. Résilience des systèmes de transport guidé en milieu urbain : approche quantitative des perturbations et stratégies de gestion. Université Paris-Est, Paris.
Gonzva, M., Balsells, M., Barroca, B., 2015. Mobilisation de l'analyse fonctionnelle pour l'étude de la résilience des quartiers et des systèmes de transport guidé face au risque inondation. Tech. Sci. Méthodes 64–75. https://doi.org/10.1051/tsm/201507064.
Gunderson, L.H., Holling, C.S. (Eds.), 2002. Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems. Island Press, Washington, DC.
Helbing, D., 2013. Globally networked risks and how to respond. Nature 497, 51–59. https://doi.org/10.1038/nature12047.
Holand, I.S., Lujala, P., Rød, J.K., 2011. Social vulnerability assessment for Norway: a quantitative approach. Nor. Geogr. Tidsskr. - Nor. J. Geogr. 65, 1–17. https://doi.org/10.1080/00291951.2010.550167.
Holling, C.S., 1973. Resilience and stability of ecological systems. Annu. Rev. Ecol. Syst. 4, 1–23.
Hutter, G., Lorenz, D.F., 2018. Social resilience. In: Vulnerability and Resilience to Natural Hazards. Cambridge University Press, pp. 190–213.
Ionescu, S., 2012. Origine et évolution du concept de résilience. In: Résilience, Connaissances de Base. p. 222.
Jigyasu, R., 2005. Disaster: a "Reality" or construct"? Perspective from the "East". In: What Is a Disaster? New Answers to Old Questions. Xlibris Corporation, pp. 49–59.
Johansson, J., Opach, T., Glaas, E., Neset, T., Navarra, C., Linner, B.-O., Rod, J.K., 2016. VisAdapt: A visualization tool to support climate change adaptation. IEEE Comput. Graph. Appl. 1–1. https://doi.org/10.1109/MCG.2016.49.
Jovanovic, A., Øien, K., Choudhary, A., 2018. An indicator-based approach to assessing resilience of smart critical infrastructures. In: Urban Disaster Resilience and Security. Springer, pp. 285–311.
Kelman, I., 2007. Hurricane Katrina disaster diplomacy. Disasters 31, 288–309. https://doi.org/10.1111/j.1467-7717.2007.01010.x.
Klein, R.J.T., Nicholls, R.J., Thomalla, F., 2003. Resilience to natural hazards: How useful is this concept? Environ. Hazards 5, 35–45. https://doi.org/10.1016/j.hazards.2004.02.001.
Knabb, R.D., Rhome, J.R., Brown, D.P., 2005. Tropical Cyclone Report - Hurricane Katrina 23-30 August 2005. National Hurricane Center.
Koks, E.E., Jongman, B., Husby, T.G., Botzen, W.J.W., 2015. Combining hazard, exposure and social vulnerability to provide lessons for flood risk management. Environ. Sci. Policy 47, 42–52. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2014.10.013.
Laganier, R., 2015. La résilience organisationnelle: se préparer et faire face à la crise. In: Résiliences: Sociétés et Territoires Face À L'incertitude, Aux Risques et Aux Catastrophes. ISTE éd., pp. 141–158.
Lhomme, S., Serre, D., Diab, Y., Laganier, R., 2013. Analyzing resilience of urban networks: a preliminary step towards more flood resilient cities. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 13, 221–230. https://doi.org/10.5194/nhess-13-221-2013.
Lhomme, S., Serre, D., Diab, Y., Laganier, R., 2010. GIS development for urban flood resilience. pp. 661–671. https://doi.org/10.2495/SC100561.
Meerow, S., Newell, J.P., Stults, M., 2016. Defining urban resilience: a review. Landsc. Urban Plan. 147, 38–49. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.11.011.
Mileti, D., 1999. Disasters by Design: A Reassessment of Natural Hazards in the United States. Joseph Henry Press, Washington, D.C. https://doi.org/10.17226/5782.
Mitchell, J.K. (Ed.), 1999. Crucibles of Hazard: Mega-cities and Disasters in Transition. United Nations University Press, Tokyo, New York.
Moynihan, D., 2009. The Response to. Hurricane Katrina.
Mustajoki, J., Hämäläinen, R.P., Marttunen, M., 2004. Participatory multicriteria decision analysis with Web-HIPRE: a case of lake regulation policy. Environ. Model. Softw. 19, 537–547. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2003.07.002.
National Academies (U.S.) (Ed.), 2012. Disaster Resilience: A National Imperative. National Academies Press, Washington, D.C.
Nguyen, K.V., James, H., 2013. Measuring household resilience to floods: a case study in the vietnamese mekong river delta. Ecol. Soc. 18. https://doi.org/10.5751/ES-05427-180313.
Nones, M., Pescaroli, G., 2016. Implications of cascading effects for the EU Floods Directive. Int. J. River Basin Manag. 14, 195–204. https://doi.org/10.1080/15715124.2016.1149074.
Norris, F.H., Stevens, S.P., Pfefferbaum, B., Wyche, K.F., Pfefferbaum, R.L., 2008. Community resilience as a metaphor, theory, set of capacities, and strategy for disaster readiness. Am. J. Community Psychol. 41, 127–150. https://doi.org/10.1007/s10464-007-9156-6.
Øien, K., 2001. Risk indicators as a tool for risk control. Reliab. Eng. Syst. Saf. 74, 129–145. https://doi.org/10.1016/S0951-8320(01)00067-9.
Opach, T., Rød, J.K., 2013. Cartographic visualization of vulnerability to natural hazards. Cartogr. Int. J. Geogr. Inf. Geovisualization 48, 113–125. https://doi.org/10.3138/carto.48.2.1840.
Pescaroli, G., Alexander, D., 2016. Critical infrastructure, panarchies and the vulnerability paths of cascading disasters. Nat. Hazards 82, 175–192. https://doi.org/10.1007/s11069-016-2186-3.
Pescaroli, G., Kelman, I., 2017. How critical infrastructure orients international relief in cascading disasters. J. Contingencies Crisis Manag. 25, 56–67. https://doi.org/10.1111/1468-5973.12118.
Pescaroli, G., Nones, M., 2016. Cascading events, technology and the floods directive: future challenges. In: E3S Web Conf. 7, 7003. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160707003.
Pidgeon, N., O'Leary, M., 2000. Man-made disasters: why technology and organizations (sometimes) fail. Saf. Sci. 34, 15–30. https://doi.org/10.1016/S0925-7535(00)00004-7.
Provitolo, D., 2012. Resiliencery vulnerability notion-looking in another direction in order to study risks and disasters. In: Resilience and Urban Risk Management. CRC Press, pp. 192.
Reghezza, M., 2006. Réflexions autour de la vulnérabilité métropolitaine: la métropole parisienne face au risque de crue centennale. Université de Nanterre-Paris X.
Reghezza-Zitt, M., Rufat, S., Djament-Tran, G., Le Blanc, A., Lhomme, S., 2012. What resilience is not: uses and abuses. Cybergeo. https://doi.org/10.4000/cybergeo.25554.
Robinson, G.M., Carson, D.A., 2016. Resilient communities: transitions, pathways and resourcefulness: resilient communities. Geogr. J. 182, 114–122. https://doi.org/10.1111/geoj.12144.
Saunders, W.S.A., Becker, J.S., 2015. A discussion of resilience and sustainability: land use planning recovery from the Canterbury earthquake sequence, New Zealand. Int. J. Disaster Risk Reduct. 14, 73–81. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2015.01.013.
Serre, D., 2018. DS3 model testing: assessing critical infrastructure network flood resilience at the neighbourhood scale. In: Fekete, A., Fiedrich, F. (Eds.), Urban Disaster Resilience and Security. Springer International Publishing, Cham, pp. 207–220. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68606-6_13.
Serre, D., 2016. Advanced methodology for risk and vulnerability assessment of interdependency of critical infrastructure in respect to urban floods. E3S Web Conf. 7, 7002. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160707002.
Serre, D., Barroca, B., Balsells, M., Becue, V., 2016. Contributing to urban resilience to floods with neighbourhood design: the case of Am Sandtorkai/Dalmannkai in Hamburg. J. Flood Risk Manag. https://doi.org/10.1111/jfr3.12253.
Serre, D., Heinzlef, C., 2018. Assessing and mapping urban resilience to floods with respect to cascading effects through critical infrastructure networks. Int. J. Disaster Risk Reduct. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.02.018.
Shaw, D., Scully, J., Hart, T., 2014. The paradox of social resilience: how cognitive strategies and coping mechanisms attenuate and accentuate resilience. Glob. Environ. Change 25, 194–203. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.01.006.
Singh-Peterson, L., Salmon, P., Goode, N., Gallina, J., 2014. Translation and evaluation of the Baseline Resilience Indicators for Communities on the Sunshine Coast, Queensland Australia. Int. J. Disaster Risk Reduct. 10, 116–126. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2014.07.004.
Steen, R., Aven, T., 2011. A risk perspective suitable for resilience engineering. Saf. Sci. 49, 292–297. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.09.003.
Suárez, M., Gómez-Baggethun, E., Benayas, J., Tilbury, D., 2016. Towards an urban resilience index: a case study in 50 Spanish Cities. Sustainability 8, 774. https://doi.org/10.3390/su8080774.
Tate, E., 2012. Social vulnerability indices: a comparative assessment using uncertainty and sensitivity analysis. Nat. Hazards 63, 325–347. https://doi.org/10.1007/s11069-012-0152-2.
Terrin, J.-J., 2014. Le projet du projet: concevoir la ville contemporaine. Parenthèses, Marseille.
The Rockefeller Foundation, 2015. City Resilience Index.
Tierney, K., 2009. Disaster response: research findings and their implications for resilience measures (Carri Research Report No. 6).
Toubin, M., 2014. Améliorer la résilience urbaine par un diagnostic collaboratif, l'exemple des services urbains parisiens face à l'inondation.
Toubin, M., Laganier, R., Diab, Y., Serre, D., 2015. Improving the conditions for urban resilience through collaborative learning of parisian urban services. J. Urban Plan. Dev. 141, 5014021. https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000229.
UNISDR, Center for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), 2015. The Human cost of weather related disasters. 1995–2015.
UNISDR-United Nations International Strategy for Disaster Reduction, 2009. Terminology on disaster risk reduction. Geneva.
Vale, L.J., Campanella, T.J., 2005. The Resilient City How modern Cities Recover from Disaster. Broché.
Vinet, F., 2010. Le risque inondation: Diagnostic et gestion. Broché Tec & Doc Lavoisier.
Voss, M., 2008. The vulnerable can't speak. An integrative vulnerability approach to disaster and climate change research. Behemoth 1. https://doi.org/10.1524/behe.2008.0022.
Weichselgartner, J., Kelman, I., 2015. Geographies of resilience: challenges and opportunities of a descriptive concept. Prog. Hum. Geogr. 39, 249–267. https://doi.org/10.1177/0309132513518834.
Wilson, G., 2013. Community resilience and environmental transitions. Taylor & Francis, Place of publication not identified.
Zevenbergen, C., 2016. Flood Resilience, in: Resource Guide on Resilience, IRGC 2016.
Zevenbergen, C., Cashman, A., Evelpidou, N., Pasche, E., Garvin, S., Ashley, R., 2010. Urban Flood Management. CRC Press.

2.2. Méthodologie collaborative avec le Service SIG d'Avignon : apports et limites

Cet article propose une méthodologie exhaustive pour améliorer la résilience urbaine. Il s'appuie sur un ensemble d'indicateurs construits avec les gestionnaires urbains. Cette approche, adaptée à la complexité territoriale, souligne l'importance d'une réflexion intégrée sur le concept de résilience. Un territoire est composé de caractéristiques structurelles, de bâtiments, d'interactions, d'infrastructures, de réseaux, d'économies, de politiques et de populations. Il est donc nécessaire de prendre en compte tous ces éléments pour aborder la question de la résilience urbaine. La méthodologie proposée tente de répondre à ce défi par ces indicateurs de mesure et par une collaboration avec les décideurs. Cette recherche met en évidence les caractéristiques susceptibles d'améliorer la résilience urbaine. Cette démarche collaborative souligne la nécessité croissante pour les territoires d'acquérir des outils pour opérationnaliser la résilience urbaine, et démontre aussi la faisabilité et l'utilité d'une telle approche. La création d'une base de donnée sur la résilience a permis de visualiser de nouvelles informations sur les SIG de la Ville d'Avignon qui sont d'ores et déjà utilisées pour analyser d'autres thèmes d'aménagement.

L'objectif de construire une démarche sur le long terme permet d'analyser les fragilités et ressources inhérentes au territoire, afin d'identifier, avant même que la catastrophe ne survienne, les fractures territoriales. Ce positionnement scientifique permet donc d'analyser la résilience urbaine comme un continuum mettant en avant des capacités proactives que le système urbain doit développer de façon à (ré) agir face à la catastrophe, développant par la même des aptitudes d'apprentissage et d'anticipation. Ce sont donc ces fractures mêmes qui sont à prendre en compte avant la survenue de la catastrophe. Le taux de chômage, la proportion de personnes âgées, l'inaccessibilité des infrastructures critiques sont autant de facteurs qui peuvent participer à une résilience faible sur un territoire urbain. Il n'est donc plus nécessaire d'attendre un choc pour identifier les facteurs de vulnérabilités et de résilience sur un territoire. L'analyse doit dès lors se faire sur un temps long afin d'identifier les capacités et fragilités intrinsèques au système.

L'atout indéniable de travailler conjointement avec les acteurs de la ville et le service SIG de la ville permet de s'assurer de l'implication des gestionnaires dans la réflexion menée autour de la résilience urbaine. Outre leur implication, réfléchir à la construction d'un système spatial d'aide à la décision sur les tenants et aboutissants est nécessaire pour adopter un concept et une méthodologie. Les résultats montrent qu'il est nécessaire et évident de s'assurer que les acteurs locaux comprennent les définitions et notions du concept de résilience afin de transformer la théorie en stratégies de gestion des risques.

La valorisation des résultats tant pour les gestionnaires que pour les habitants de la collectivité est également une étape essentielle à ce travail, afin de s'assurer de la compréhension du concept et de sa traduction en projets et objectifs d'aménagement.

3. « A spatial decision support system for enhancing resilience to floods. Bridging resilience modelling and geovisualization techniques »

Statut de l'article n°3 : En cours d'évaluation dans *Natural Hazards and Earth System Sciences* (NHESS) en Septembre 2019

◊ Heinzlef, C., Becue V., et Serre D. « A spatial decision support system for enhancing resilience to floods. Bridging resilience modeling and geovisualization techniques ». Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss. https://doi.org/10.5194/nhess-2019-306, in review, 2019

3.1. Les techniques de géovisualisation dans la gestion des risques : contexte

La cartographie est une des principales méthodes utilisées pour analyser, représenter et examiner les multiples caractéristiques des risques et participer à leur gestion. La cartographie permet à la fois d'identifier, de créer, de communiquer et de transmettre une information (Cauvin et al., 2007). Elle favorise la visualisation et est donc un outil d'analyse, de construction et de transmission de connaissances. C'est donc un outil clef dans le processus d'aide à la décision (Kraak and Ormeling, 2003) pour matérialiser et rendre plus facilement compréhensibles des éléments et processus complexes. Les cartes peuvent avoir plusieurs supports. Lorsque celles-ci sont consultables sur des interfaces informatiques et qu'on peut y associer des éléments interactifs et dynamiques pour les utilisateurs, on utilise le terme de géovisualisation.

La géovisualisation est une méthode qui se situe au carrefour des pratiques de cartographie, de systèmes d'informations géographiques et de visualisation. Elle se définie comme étant « *l'ensemble des outils de visualisation permettant l'exploration interactive de données géolocalisées en vue de construire une connaissance sans hypothèses a priori* » (Maceachren and Kraak, 1997). La géovisualisation permet à la fois de traiter des données géolocalisées et hétérogènes, de traiter des images, de visualiser des concepts scientifiques, de cartographier les données et traitements et de produire de la connaissance. Par conséquent, la méthodologie de la géovisualisation améliore la connaissance territoriale et conduit à des outils tels que les systèmes d'aide à la décision représentant ainsi une méthodologie intéressante pour l'étude de la gestion spatiale des risques.

L'outil spatial d'aide à la décision est un modèle conceptuel de définition et de mesure de la résilience urbaine. Il s'appuie sur les techniques de géovisualisation afin d'opérationnaliser le concept. L'objectif est de clarifier l'approche de la résilience en définissant trois indicateurs de résilience et de les cartographier via des pratiques de géovisualisation. L'idée est de rendre accessibles le processus de transformation et d'analyse de données pour les acteurs locaux tout en facilitant l'obtention, la compréhension et l'utilisation des résultats. La méthodologie a

permis d'associer les avancées de modélisation du concept et les avantages de la géovisualisation. Les résultats permettent l'accessibilité et la compréhension des données, traitements et productions cartographiques pour les acteurs locaux.

Rôle	Auteurs
Conceptualisation	Damien Serre / Charlotte Heinzlef
Méthodologie	Charlotte Heinzlef
Traitements	Charlotte Heinzlef
Investigation	Charlotte Heinzlef
Ecriture	Charlotte Heinzlef
Visualisation	Charlotte Heinzlef
Supervision	Damien Serre, Vincent Becue
Administration du projet	Damien Serre, Vincent Becue

https://doi.org/10.5194/nhess-2019-306
This is just a preview and not the published preprint.
© Author(s) 2019. CC-BY 4.0 License.

Natural Hazards and Earth System Sciences
Discussions

A spatial decision support system for enhancing resilience to floods. Bridging resilience modeling and geovisualization techniques

Charlotte Heinzlef[1,2], Vincent Becue[2], Damien Serre[3]

[1] UMR 7300 ESPACE – Avignon University, 74, rue Louis Pasteur - Case 19 - 84029 Avignon Cedex 1 – France, charlotte.heinzlef@univ-avignon.fr
[2] University of Mons, Faculty of Architecture and Urban Planning Rue d'Havré 88, 7000, Mons, Belgium, charlotte.heinzlef@umons.ac.be, vincent.becue@umons.ac.be

[3] UMR 241 EIO, French Polynesia University - B.P. 6570 - 98702 Faa'a - Tahiti – French Polynesia, damien.serre@upf.pf

Abstract

In the context of climate change and increasing urbanization, floods are considerably affecting urban areas. The concept of urban resilience may be an interesting means of responding to urban flood issues. The objective of this research is to propose a spatial decision support tool based on geovisualization techniques and a resilience assessment method. The goal is to localize the level of resilience modeled in different territories. The methodology proposed consists in integrating three resilience indicators applied to a case study in Avignon (Provence Alpes Côte d'Azur Region, France) and the use of geovisualization techniques: using GIS for data processing and analysis, visualization, mapping and model processing. The methodology integrates decision-making by identifying characteristics capable of improving urban resilience and facilitating its understanding using a visual tool. The results demonstrate the usefulness of modeling resilience using geovisualization techniques to identify the potential for local resilience, integrate local stakeholders into a process of clarifying the concept through the contribution of visualization, and consider easier access to this concept based on data analysis, processing and visualization through the design of maps.

Key words: Geovisualization, Urban resilience modeling and mapping, flood risks

1- Introduction

1.1 Issues and background

The context of climate change has led to an increase in disasters, among which urban floods are considered the most damaging, accounting for 43.4% of climate-related disasters over the period 1998-2017 (Wallemacq and House, 2018). At present, the European Environment Agency ranks France third among European countries affected by natural hazards over the period 1980-2017 (European Environment Agency, 2019), as 33% of its municipalities were affected with "*an estimated annual cost of around 250 million euros*" (Lhomme, 2012). The Mediterranean region is among the most vulnerable in France, with an average of 10 deaths per year caused by floods. 42% of the population of the Vaucluse Department live in areas at risk from floods and it ranks first among departments exposed to flood risk, in comparison to the national average of 11% of the population living in flood risk areas in 2009. With 147/151 municipalities in the department affected by floods, Vaucluse is extremely vulnerable to this growing risk.

https://doi.org/10.5194/nhess-2019-306
This is just a preview and not the published preprint.
© Author(s) 2019. CC-BY 4.0 License.

Natural Hazards and Earth System Sciences
Discussions

To address this growing risk, the concept of resilience has been included step by step into risk management strategies, worldwide, as it offers a systemic approach to and analysis of risks, their issues, territories, populations and management services (Bakkensen et al., 20). The concept of resilience can be defined as "*the ability of a system, community or society exposed to hazards to resist, absorb, accommodate to and recover from the effects of a hazard"* (UNISDR-United Nations International Strategy for Disaster Reduction, 2009). Although and despite a significant increase in the use of the concept and its positive opportunities for risk strategies, concrete progress towards operationalization is still needed (Klein et al., 2003). The objective of this research is therefore to propose an approach to address this lack of operationality. While some studies have been carried out in Europe to operationalize the concept of vulnerability through indicators (Opach and Rød, 2013), few of them mention resilience. When such is the case (Lhomme et al., 2013; Suárez et al., 2016), it is essentially from a technical and organizational angle, but without considering the social and therefore systemic dimensions of the territory concerned.

This research therefore aims at using the concept of resilience in a practical and understandable manner at the city level, with the design of a spatial decision support system. The originality of the methodology is justified by the collaborative approach taken, characterized by a socio-economic partnership with the City of Avignon and its urban services. By combining the experiences of managers and politicians with scientific advances, the approach aims at addressing the challenges and limitations of the concept of urban resilience in the face of flood risk. The result of joint design, the spatial decision support system is being tested in the Avignon area in response to more risky situations. Spatial decision makes it possible to establish a link between scientific advances and local knowledge and practices. This spatial decision support system involves redefining the criteria for resilience and measuring the potential for resilience (Frazier et al., 2013). It aims at overcoming:

- theoretical obstacles, by designing indicators to assess resilience;
- methodological issues by representing the potential for resilience through mapping tools used to provide stakeholders with a medium capable of making them aware of the concept, integrate it into their risk management strategies and transform it into concrete and applicable actions.

Meeting the challenges of operationalizing resilience therefore involves rethinking modeling and mapping practices as well as focusing on understanding the concept, adopting it and integrating stakeholders into the resilience process.

1.2 Research Focus

We adopt the viewpoint that promoting techniques to make resilience operational can be achieved by collaboration and visualization methods. Getting people from different backgrounds to interact (Callon et al., 2001), enriches discussions, encourages the expression of opposing viewpoints on the same subject, and makes it possible to be both more measured and more incisive in a specific field. Resilience is therefore a subject that requires the confrontation of views, and scientific and local knowledge (Radhakrishnan et al., 2017). We therefore propose to develop strategies to operationalize resilience so that they are constructed jointly with the city's actors, allowing their direct investment. Rather than taking a top-down approach, our goal is to create a common discussion around resilience issues to initiate constructive dialogues to overcome the biases of each group of stakeholders (Jacobs et al., 2005; Moser, 2005; Næss et al., 2006; Patt and Dessai, 2005). In addition, we consider

https://doi.org/10.5194/nhess-2019-306
This is just a preview and not the published preprint.
© Author(s) 2019. CC-BY 4.0 License.

Natural Hazards and Earth System Sciences
Discussions

that techniques translating a fuzzy concept into a practical spatial decision support system - such as geovisualization and modelling - would promote stakeholder involvement and understanding of the related issues and thus lead to adapted decision-making. The motivation of the article is to demonstrate that combining certain geovisualization techniques with resilience modeling will contribute to better understanding of the concept, and lead to its operationalization and translation into tangible strategies at the local level.

We defend the hypothesis that defining resilience criteria and translating them visually for implementation in an easy-to-use tool will promote and better integrate resilience techniques in view to managing urban floods. By carrying out a municipality scale study and combining a collaborative methodology and GIS resilience modeling to develop a geovisualization tool, we hope to clarify the concept, and ensure its understanding and adoption by urban planners in their approaches to urban dynamics. In the first section we present a state of the art of resilience modeling and geovisualization techniques in the field of climate risk management, and then the methodologies chosen for this research. Finally, we present the first application of this research and its results in Avignon (France). Finally, we discuss these initial results.

2. Resilience modelling and geovisualization techniques for risk management: a state of the art

2.1 The resilience concept and modeling approaches

As the concept of resilience is multidisciplinary, its definition and application as a risk management strategy is extremely complex. In order to move towards its operationalization, it is necessary to build an analysis model to address the concept. Several studies have attempted to build analysis models to define indicators or a specific baseline (Bakkensen et al., 2017; Fox-Lent et al., 2015).

The 100 Resilient Cities (100RC) consortium was launched by the Rockefeller Foundation in 2013. The purpose of the 100 Resilient Cities consortium is to help cities around the world become more resilient to the physical, social and economic challenges of the 21st century. 100RC supports the adoption and integration of a vision of resilience that includes not only disasters - earthquakes, fires, floods, etc. - but also the tensions that weaken the urban area on a daily or cyclical basis. Resilience is defined as the ability of individuals, communities, institutions, businesses and urban systems to survive, adapt and evolve, regardless of the types of chronic stresses or shocks they may encounter. A holistic approach is advocated. 100RC has built a framework defining the characteristics of urban resilience (Fig.1).

https://doi.org/10.5194/nhess-2019-306
This is just a preview and not the published preprint.
© Author(s) 2019. CC-BY 4.0 License.

Natural Hazards and Earth System Sciences
Discussions
Open Access
EGU

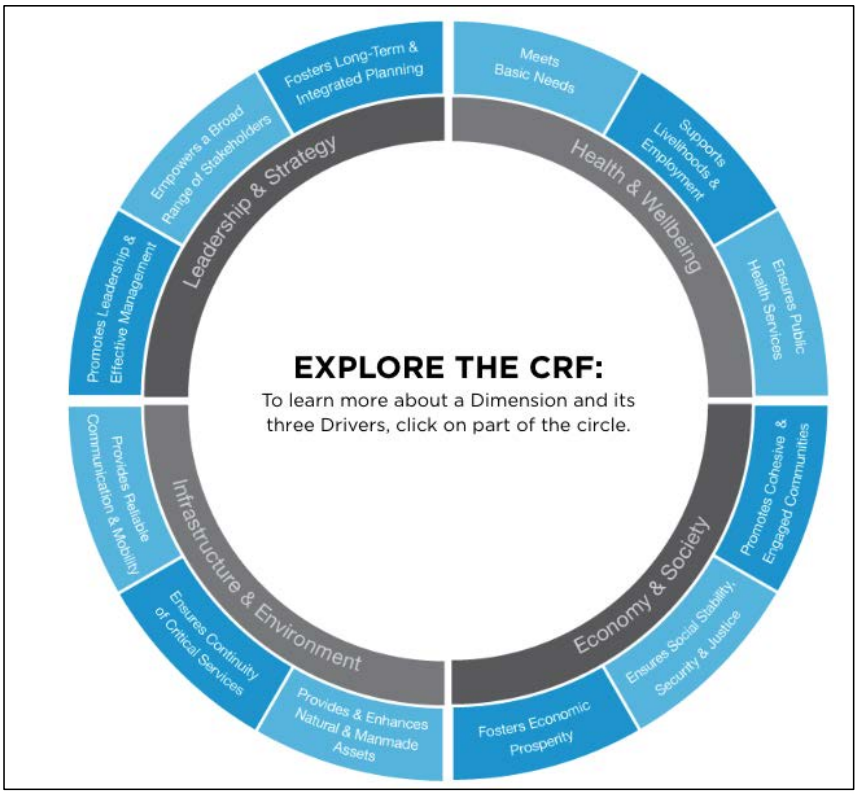

Figure 1: 100 Resilient Cities Framework, (100 Resilient Cities, s. d.)

The definition of resilience via these indicators allows identifying criteria for resilience in a territory or within a population. It allows launching discussion around an initially fuzzy concept. However, it does not allow visualizing criteria or resilience potentials at the local level (100 Resilient Cities, n.d.). Mapping is non-existent and the absence of tangible data makes it difficult for local populations and actors to appropriate the concept, understand it, and reproduce it.

Another study focused on identifying resilience capacities applied to urban networks. It led to the creation of the DS3 (Spatial Decision Support System) model (Serre, 2018). Three resilience capacities were defined to study resilience (Serre, 2018)), namely resistance, absorption, and recovery (Fig.2).

https://doi.org/10.5194/nhess-2019-306
This is just a preview and not the published preprint.
© Author(s) 2019. CC-BY 4.0 License.

Natural Hazards and Earth System Sciences
Discussions
Open Access
EGU

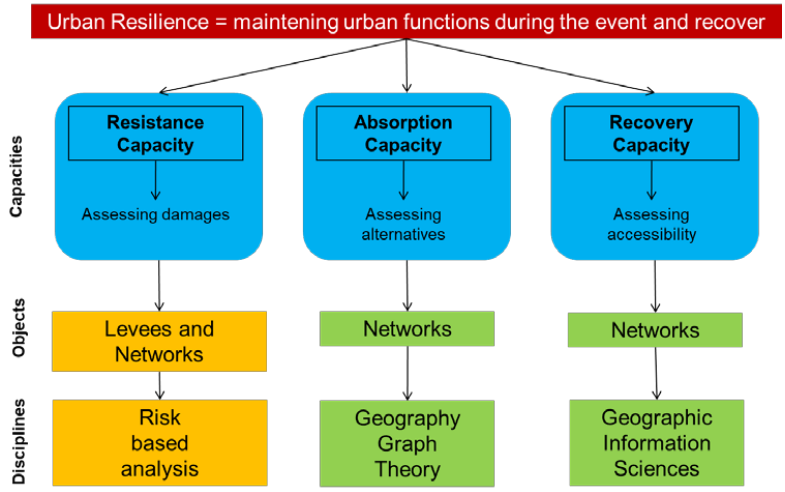

Figure 2: DS3 Model (Serre, 2016)

The resistance capacity is necessary to determine the material damage of the networks. It is a given that the more damaged a network is, the slower and more difficult it will be to return it to effective service. The results of the damage analysis make it possible to measure this damage, and determine the interdependencies between the various components of the networks.

Absorption capacity represents the alternatives available to the network following a failure. The idea is to highlight solutions to maintain service continuity despite floods, operating in degraded mode.

Finally, the recovery capacity represents the time required to retrofit the networks until reaching a full level of service.

The DS3 model can be used to identify factors that would lead to increased urban resilience, highlighting the importance of urban networks and critical infrastructures. This technical approach focuses mainly on urban networks. However, cities comprise many factors, such as social dynamics, urban interactions and technical components, leading to additional indicators that must be monitored (Serre and Heinzlef, 2018).

These two approaches attempt to address the biases of conceptualization and modeling resilience. But, in the first approach of the concept and data visualization, there is nothing evident about how the results should be processed and explored. In the second approach, the exploration of the results is visible through the application of the methodology, notably in a case study on Hamburg (Serre et al., 2016). Nonetheless, the exploration and analysis of the data is not accessible to the public concerned, limiting their understanding and appropriation of the method. Moreover, this approach analyzes the territory only through urban networks and not with the other components that shape it.

The objective of this work is therefore to model and operationalize resilience as comprehensively and exhaustively as possible. The aim is to analyze it at the local level in order to advise stakeholders and lead to decision-making that integrates resilience in risk management strategies

https://doi.org/10.5194/nhess-2019-306
This is just a preview and not the published preprint.
© Author(s) 2019. CC-BY 4.0 License.

Natural Hazards and Earth System Sciences
Discussions

2.2 Geovisualization techniques: added values in risk management processes

For many years, risk mapping was one of the main methods used to analyze, represent, and examine the multiple characteristics of risks and risk management strategies (Barroca and Serre, 2018). However, new methods have been introduced such as Geographic Information Systems (GIS), and scientific information visualization (Kraak, 2003). GIS gives access to voluminous and heterogeneous tools like databases and graphic applications to establish interactions between data and maps. These interactions can be visualized through an interface used to explore the characteristics of data. The adaptation of scientific visualization to mapping was initially called "geographic visualization" and then "geovisualization" (Maceachren and Kraak, 1997). Geovisualization is defined as "*the set of visualization tools that allow interactive exploration of geolocated data in order to build knowledge without assumptions a priori*" (Maceachren and Kraak, 1997). Geovisualization includes fields such as scientific visualization, mapping, image processing, knowledge extraction, and GIS.

Therefore, geovisualization is a synthesis approach applied to GIS techniques that integrates practices such as mapping, visualization, data and image analysis, by analyzing geospatial data (MacEachren and Kraak, 2001). This methodology offers the possibility of representing multidimensional, voluminous and heterogeneous data. More specifically, geovisualization is mainly adapted to the representation and analysis of georeferenced data. The mapping exercise is divided into several objectives: explore, analyze, synthesize and present. Geovisual tools must be adapted to these different uses. The different tools currently available can be differentiated by three criteria. The first is the audience, which can range from the "general public" with little knowledge of geovisualization issues to experts with good knowledge of the subject. The second is the degree of interactivity offered by the geovisualization tool. The last criterion is knowledge of the data, which varies from the domain of the known to the domain of the unknown (MacEachren and Kraak, 1997). The 4 uses of geovisualization can therefore be placed inside a cube (Fig.3). Each axis of this cube (x,y,z) represents one of the 3 criteria previously mentioned (audience, interactivity, data relations).

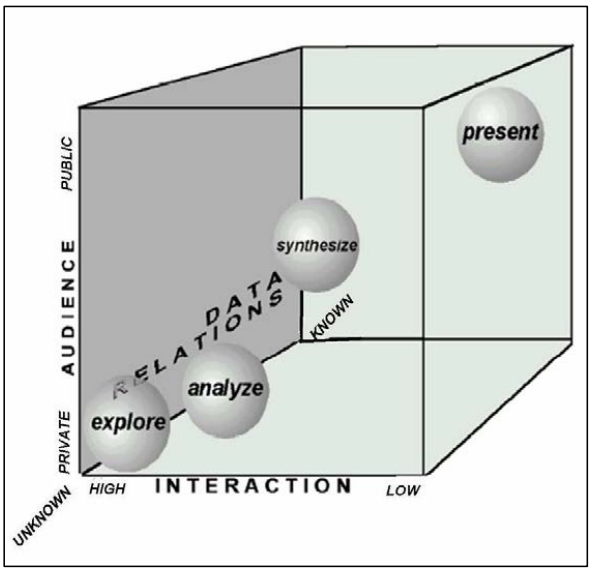

Figure 3: The Map-Use-Cube (Maceachren and Kraak, 1997)

https://doi.org/10.5194/nhess-2019-306
This is just a preview and not the published preprint.
© Author(s) 2019. CC-BY 4.0 License.

Natural Hazards and Earth System Sciences
Discussions

This data representation (Donolo, 2014) – also called "virtual science" - allows constructing, reconstructing, representing and interpreting scientific issues (Yasobant et al., 2015). The fact of representing spatiotemporal data in different forms provides better understanding of the different phenomena involved, resulting in either better dissemination of the information or better decision-making. This methodology allows exploring hypotheses, sharing arguments, developing solutions and, most importantly, building common knowledge around the same issue (MacEachren, 1997).

Consequently, these characteristics and advantages make geovisualization an interesting methodology for studying risk management. Crisis management is, indeed, a concrete example where it is useful to use visual, map-based tools to integrate, assess and apply multisource geospatial information and data (MacEachren et al., 2004). Indeed, in a context of climate change and related uncertainties, modeling or simulating disasters such as floods is becoming increasingly complex. Current techniques are limited in the face of the complexity of floods, particularly because of the multiple reasons, sources and causes of disasters (Leskens et al., 2014; Löwe et al., 2018), as they are essentially used to model urban planning projects or response strategies to cope with the increase in the occurrence of such events. Many studies have used geovisualization to analyze the complexity of flood risks, whether to analyze flooding from the perspective of risk, for instance expected damage (Meyer et al., 2009; Ward et al., 2011), hazard, such as duration, velocity, water depth, etc. (Schumann et al., 2009), management strategy (de Moel et al., 2015), at the national (Burby, 2001), regional (Elmer et al., 2012; Gaslikova et al., 2011; Vorogushyn et al., 2012), and local (Aerts et al., 2013; Apel et al., 2009; Gerl et al., 2014) levels, and even on the built scale (Fig.4), with, for example, FReT (Flood Resilience Technologies) (Schinke et al., 2016; Golz et al., 2015).

https://doi.org/10.5194/nhess-2019-306
This is just a preview and not the published preprint.
© Author(s) 2019. CC-BY 4.0 License.

Natural Hazards and Earth System Sciences
Discussions
Open Access
EGU

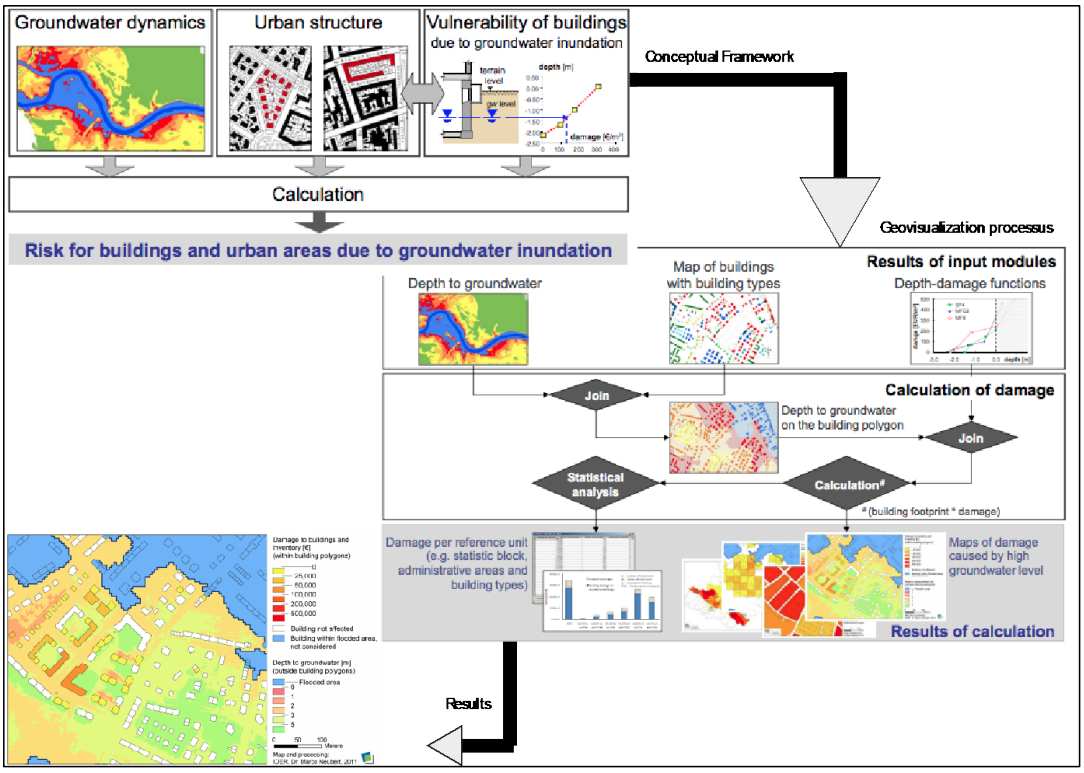

Figure 4: Links between resilience modeling and geovisualization techniques – at the building scale (Schinke et al., 2012)

To summarize, geovisualization helps to explore data using visual geospatial representations to imagine hypotheses, solve problems and co-construct scientific knowledge (Kraak, 2003). Therefore, geovisualization methodology improves territorial knowledge and leads to tools such as decision support systems, by making possible dialogues between users and stakeholders and promoting collaborative approaches. In the field of risk management, it is essential to defuse subjects of tension, in order to present a risky situation objectively.

2.3 Making urban resilience operational through geovisualization techniques

Although several methods can be used to model risk characteristics, such as hydraulic modeling (Ernst et al., 2010) and geomorphological parameters (Bathrellos et al., 2012), it is quite difficult to model such fuzzy concepts like resilience and vulnerability, despite the common use of the latter in risk management. While the implementation of resilience policies and the design of resilient cities is desirable, assessing resilience and implementing it is complex. Several researchers have examined the difficulty of defining, implementing and evaluating urban resilience, usually through a geovisualization approach.

Cutter and Finch (2008) presented SoVI, a tool providing a county-level (USA scale) comparative metric of social vulnerability to natural hazards, based on socioeconomic and demographic profiles. The aim of SoVI is to illustrate the geographic patterns of the USA, by defining social vulnerability as the sensitivity of a population to natural hazards and its ability to respond to and recover from them. Using several maps and in view to improving

https://doi.org/10.5194/nhess-2019-306
This is just a preview and not the published preprint.
© Author(s) 2019. CC-BY 4.0 License.

Natural Hazards and Earth System Sciences
Discussions
Open Access
EGU

emergency management, SoVI identifies which areas of the American territory are more or less vulnerable and why. Geovisualization techniques improve understanding of the concept of vulnerability and help urban managers to localize vulnerable areas and variables.

Based on SoVI, a Norwegian study examined the vulnerability of territories to climate change (Opach and Rød, 2013). To avoid an increase in local and national vulnerability, the researchers built a ViewExposed tool (Fig.5) whose objective was to inform local authorities about the most vulnerable areas of Norwegian territory and the causes of this vulnerability.

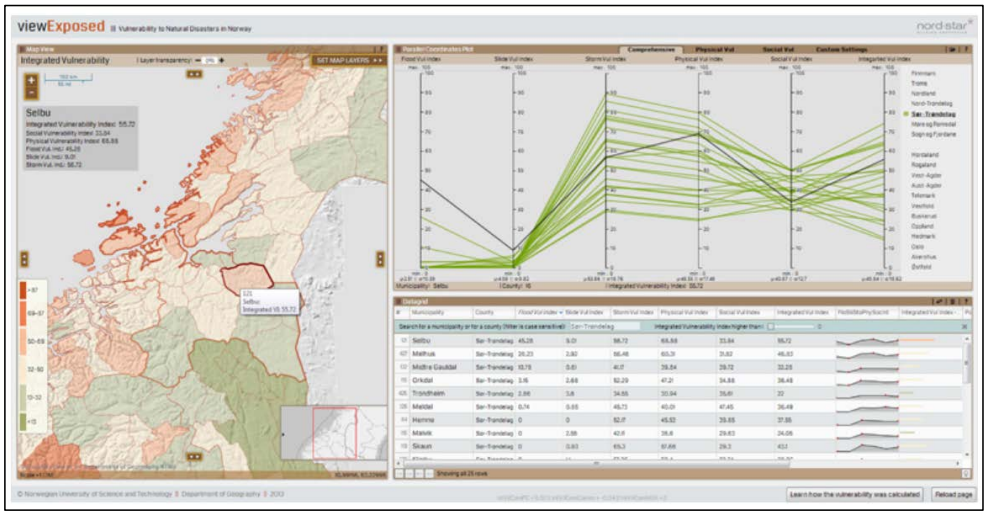

Figure 5: The ViewExposed Interface (Opach and Rød, 2013)

The ViewExposed tool focuses on Norwegian municipalities' exposure to natural hazards and the capacity of local populations to resist them. This interface tool was designed for professionals, local elected officials and local residents. It is the result of collaboration between scientists and local experts via workshops. Although focused on the concept of vulnerability, this tool also integrates the response of local managers and actors to natural disasters, corresponding to the first step in resilience integration.

Another team of researchers and insurers developed a tool to help people in the Nordic countries to protect themselves and prepare for climate risks. The main target users are private landowners, but this tool can also be used by land-use planners and property managers. The tool, VisAdapt (Johansson et al., 2016) is intended as a guide on how to prepare for climate events liable to affect individual homes. It is very simple to use, so every citizen can employ it. The obvious interest of this tool is that it allows addressing local inhabitants directly by proposing solutions to adapt to natural risks linked to climate change.

These tools have the merit of proposing operational instruments to obtain a clearer idea of the vulnerability concept involved. The main scale is above all the national scale which, despite major advances in the visualization and knowledge of vulnerable zones, does not always lead to decision-making by local actors and managers, since the scale is sometimes too broad for actions. Beyond the spatial scale, the choice of data and tools for processing, analysis and visualization have not been designed for non-expert audiences. Data is not always freely accessible,

https://doi.org/10.5194/nhess-2019-306
This is just a preview and not the published preprint.
© Author(s) 2019. CC-BY 4.0 License.

Natural Hazards and Earth System Sciences
Discussions

nor are the processing and representation tools. Some tools are intended only for professionals while others point to the need to open the results to a wider audience. In addition, the data are not accessible and downloadable, which makes the methodology difficult to adopt and reapply in other territories outside the scope of expertise of the research team. The limits are therefore divided between the choice of spatial scale, the free and accessible nature of data and tools, and the non-integration of local actors, and thus the assurance of their understanding of the tools and concepts used. Here, we intend to overcome these limitations by proposing the approach we have developed.

3. Methods: linking resilience modeling and geovisualization techniques

The objective of this research consists in:

- making the concept of resilience more understandable through the construction of 3 indicators to define and measure resilience;
- producing mapping results to quantify and visualize the results obtained;
- designing a comprehensive method including choice of data, processing and analyses for local actors, by mobilizing geovisualization techniques;
- mapping the results to support decisions in favor of resilience to floods.

3.1 A framework for defining resilience data?

To analyze urban territories including their complexity through the prism of resilience, it was necessary to define their issues and challenges, their dynamics, material and immaterial interactions, and their structures that impact on the functioning of urban space. It is essential to understand the city as a system (Gardner, 2016). These urban systems, like any living organism, are complex and hierarchical. Some studies have explored the impact of rapid urbanization, leading to complex territorial responses and the lack of suitable reactions. In parallel, challenges can increase when the country's gross domestic product (GDP) decreases. Nevertheless, in some case studies, urbanization has been shown to have other results and is one of main elements to be taken into account when building response capacity to risks (Garschagen and Romero-Lankao, 2015). This response capacity can be determined by flood preparedness (Chinh et al., 2016), government implication and risk governance (Garschagen, 2015). Studying the city in the face of risks and its resilience capacity requires considering different spatial scales of interactions and challenges. Therefore, several questions must be asked: Who is vulnerable/resilient? What? When? What elements could limit the impacts of a crisis like a flood event? Are they efficient before, during and after a flood?

These questions allowed us to establish three resilience indicators to study technical, urban and social resilience (Heinzlef et al., 2019). The methodological choice of using indicators was based on several arguments. The first one is that by defining and characterizing an abstract concept, indicators allow sensitizing both the scientific community and the public to complex subjects (Prior and Hagmann, 2014). In addition, resilience indicators can make an important contribution to assess a community's needs and goals while helping it to develop resilience strategies (Cutter, 2016). These indicators, useful when creating a strategy, are also important for monitoring the decision-making process. Finally, an essential benefit of using such indicators is that they can act

https://doi.org/10.5194/nhess-2019-306
This is just a preview and not the published preprint.
© Author(s) 2019. CC-BY 4.0 License.

Natural Hazards and Earth System Sciences
Discussions

as driving factors for risk management, by including the concept of resilience clearly and more holistically (Linkov et al., 2014).The objective is to analyze the different social, urban and technical components (Serre and Heinzlef, 2018) of the area concerned (Tab.1). The indicators were designed after adapting the Baseline Resilience Indicators for Communities (BRIC) methodology (Cutter et al., 2008; Patil et al., 2008; Singh-Peterson et al., 2014).

Resilience indicators	***Variables***	***Sources***	***Impact on resilience***	***References***
Social resilience indicator	*Population Structure*			
	00-02 years old	INSEE	Negative	(Morrow, 2008); (Cutter, 2010); (Opach et Rod, 2016)
	25-39 years old	INSEE	Positive	(Morrow, 2008); (Cutter, 2010); (Opach et Rod, 2016)
	more than 80 years old	INSEE	Negative	(Morrow, 2008); (Cutter, 2010); (Opach et Rod, 2016)
	Professional situation			
	Active 15-64 years old	INSEE	Positive	(Tierney et al., 2001)
	Unemployed 15-64 years old	INSEE	Negative	(Tierney et al., 2001; Tierney, 2014)
	Habits			
	Active people 15 years or older not using transport	INSEE	Positive	
	Active people 15 years or older, using public transport	INSEE	Positive	
	Insurances			
	Health insurance beneficiaries	INSEE	Positive	(Heinz Center 2002)
	Beneficiaries of CAF allocations	INSEE	Positive	(Heinz Center 2002)
	Education			
	Exit before the 3rd grade	INSEE	Negative	(Norris et al. 2008), (Morrow 2008)
	Bac +2 and better	INSEE	Positive	(Norris et al. 2008), (Morrow 2008)
Urban resilience indicator	*Buildings*			
	Number of main residences built before 1919	INSEE	Positive	(Mileti, 1999); (Cutter, 2010), (Opach et Rod, 2016)
	Number of main residences built from 1919 to 1945	INSEE	Negative	(Mileti, 1999); (Cutter, 2010), (Opach et Rod, 2016)
	Number of main residences built from 1946 to 1970	INSEE	Negative	(Mileti, 1999); (Cutter, 2010), (Opach et Rod, 2016)
	Number of main residences built from 1971 to 1990	INSEE	Negative	(Mileti, 1999); (Cutter, 2010), (Opach et Rod, 2016)
	Number of main residences built from 1991 to 2005	INSEE	Negative	(Mileti, 1999); (Cutter, 2010), (Opach et Rod, 2016)
	Number of main residences built from 2006 to 2010	INSEE	Positive	(Mileti, 1999); (Cutter, 2010), (Opach et Rod, 2016)
	Critical Infrastructures			
	Defense	SIRENE	Positive	(Sylves, 2007); (Cutter, 2010)
	Fire and rescue services	SIRENE	Positive	(Sylves, 2007); (Cutter, 2010)
	Hospital activities	SIRENE	Positive	(Opach et Rod, 2016)
	Economic dynamics			

https://doi.org/10.5194/nhess-2019-306
This is just a preview and not the published preprint.
© Author(s) 2019. CC-BY 4.0 License.

Natural Hazards and Earth System Sciences
Discussions
Open Access
EGU

	Tourist and other short-term accommodation	SIRENE	Positive	(Tierney, 2009)
	Creation of new companies	SIRENE	Positive	
	Removal of companies	SIRENE	Negative	
Technical resilience indicator				
	Diversity of networks	Municipality data	Positive	(Bambara, 2014); (Balsells et al, 2015)
	Network accessibility			
	Accessibility of networks by public road within a 100m radius	Municipality data	Positive	(Cutter, 2010); (Opach et Rod, 2016) ; (Lhomme et al., 2013)

Table 1: Example of data selection, sources and references

3.2 Resilience processing

The advantages of using geovisualization techniques to remove barriers to resilience are:

- analyzing heterogeneous and geolocated data;

- supplying a visualization based on the most recent scientific advances;

- extracting, producing and sharing data with innovative layouts.

To address these three pillars, we propose to clarify some of the resilience criteria defined above (Fig.6).

Figure 6: Resilience characteristics (Serre & Heinzlef, 2018)

https://doi.org/10.5194/nhess-2019-306
This is just a preview and not the published preprint.
© Author(s) 2019. CC-BY 4.0 License.

Natural Hazards and Earth System Sciences
Discussions

We argue that analysis of resilience at the local level is facilitated by using open access data. On the other hand, data processing and analysis become more understandable for local actors when tools are chosen that highlight the visualization.

3.2.1 Data used for resilience assessment

We chose to use mainly open data which we acquired via the INSEE service of the French Ministry of the Economy and Finance (National Institute of Statistics and Economic Studies), whose function is to collect, analyze and disseminate data. Since we wanted to analyze urban resilience at the community scale as finely as possible, we chose to analyze the IRIS (Islets Grouped for Statistical Information) scale which constitutes the basic building block for the dissemination of infra-communal data.

The concept of "open" and accessible science has been developed to strengthen dialogue and commitment among scientists and the local population around common issues and problems, by creating a language and vocabulary understandable to everyone. While there are obvious limitations to Open Data - security, privacy and property protection - it is nonetheless accepted that using ideas and knowledge freely is a universal right. This is why we chose to use a data source whose access, use and downloading are free, to ensure not only the reproducibility (Jovanovic et al., 2018) of the methodology, but also to participate in the education and communication of the concept of resilience.

In addition to the INSEE INSPIRE database, we used the data from the SIRENE database (INSEE) in Open Source. The SIRENE database is an INSEE service used to identify all the characteristics of companies and establishments. The information provided gives a precise idea of the company's activity, its date of creation, etc. These data were used for the urban and technical resilience indicators to demonstrate economic, urban and technical dynamism.

Data from the city cadaster (MAJIC) were also used to complete the Open Data database. These data are considered sensitive and owned exclusively by municipalities. It is therefore essential to create a partnership with a city and its GIS services.

3.2.2 Method and tools for resilience assessment

After selecting the raw data, data were transformed and normalized with a theoretical orientation. In order to understand the frequency of each variable, each item of raw data has been transformed into percentages (Equation (1) and Equation (2).

$$Social\ Resilience = \frac{Variable}{IRIS\ Population} \quad (1)$$

$$Urban\ resilience = \frac{Variable}{IRIS\ AREA} \quad (2)$$

$$Technical\ resilience = \frac{Variable}{IRIS\ AREA} \quad (3)$$

https://doi.org/10.5194/nhess-2019-306
This is just a preview and not the published preprint.
© Author(s) 2019. CC-BY 4.0 License.

Natural Hazards and Earth System Sciences
Discussions

Nevertheless the weighting is 1 for all the variables (Holand et al., 2011). This single weighting is explained by the willingness to avoid disparities between the variables (Fekete, 2009), since some of them are sensitive and subjective. Indeed, we have no theoretical references (Esty et al., 2005) and there is no practical experience (Fekete, 2009) on which to determine weights that are mostly subjective. Besides, to apply such weights does not necessarily reflect decision makers' and urban planners' priorities and realities (Cutter et al., 2010). Nonetheless, since this approach puts forward a participatory and collaborative methodology, readjusting the weight of these variables with regard to managers' perceptions is entirely justified and in line with the current approach.

Following this process, it was necessary to determine a normalization. Normalization allows adjusting a series of values (typically representing a set of measurements) according to a transformation function to make them comparable with certain specific reference points. We proceeded with a Min-Max standardization (Casadio Tarabusi and Guarini, 2013) to obtain a positive resilience impact variable, Equation (3), and a negative resilience impact variable, Equation (4), where each variable is decomposed into an identical range between zero (worst rank) and one (best rank), to create indicators with similar measurement scales, and to compare them.

$$\frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (3)$$

$$1 - \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (4)$$

The choice of processing tools was influenced by the availability of Open Source tools in order to uphold transparency and collaborative approaches as well as the availability of such tools to all stakeholders. To create the computer script, we used a tool, the Feature Manipulation Engine (FME) to extract, transform and load raw data (Extraction Transformation Loading). Its interface allows visualizing each step of the processing, from loading raw data (INSEE files) to choosing variables, while integrating the resilience formula to finally obtain the results. Although this tool has a cost, it is nevertheless used by GIS practitioners on a large scale, nationally and internationally.

Several steps (Fig.7) were necessary to set up the computer script, integrate the input data, create a geometry, generate the processing and forecast an overall resilience value. The output data is in SpatiaLite format (sl3 format), which is a spatial extension of SQLite and provides vector geodatabase capacity. This format can be understood by many processing, visualization and mapping software applications including QGIS.

https://doi.org/10.5194/nhess-2019-306
This is just a preview and not the published preprint.
© Author(s) 2019. CC-BY 4.0 License.

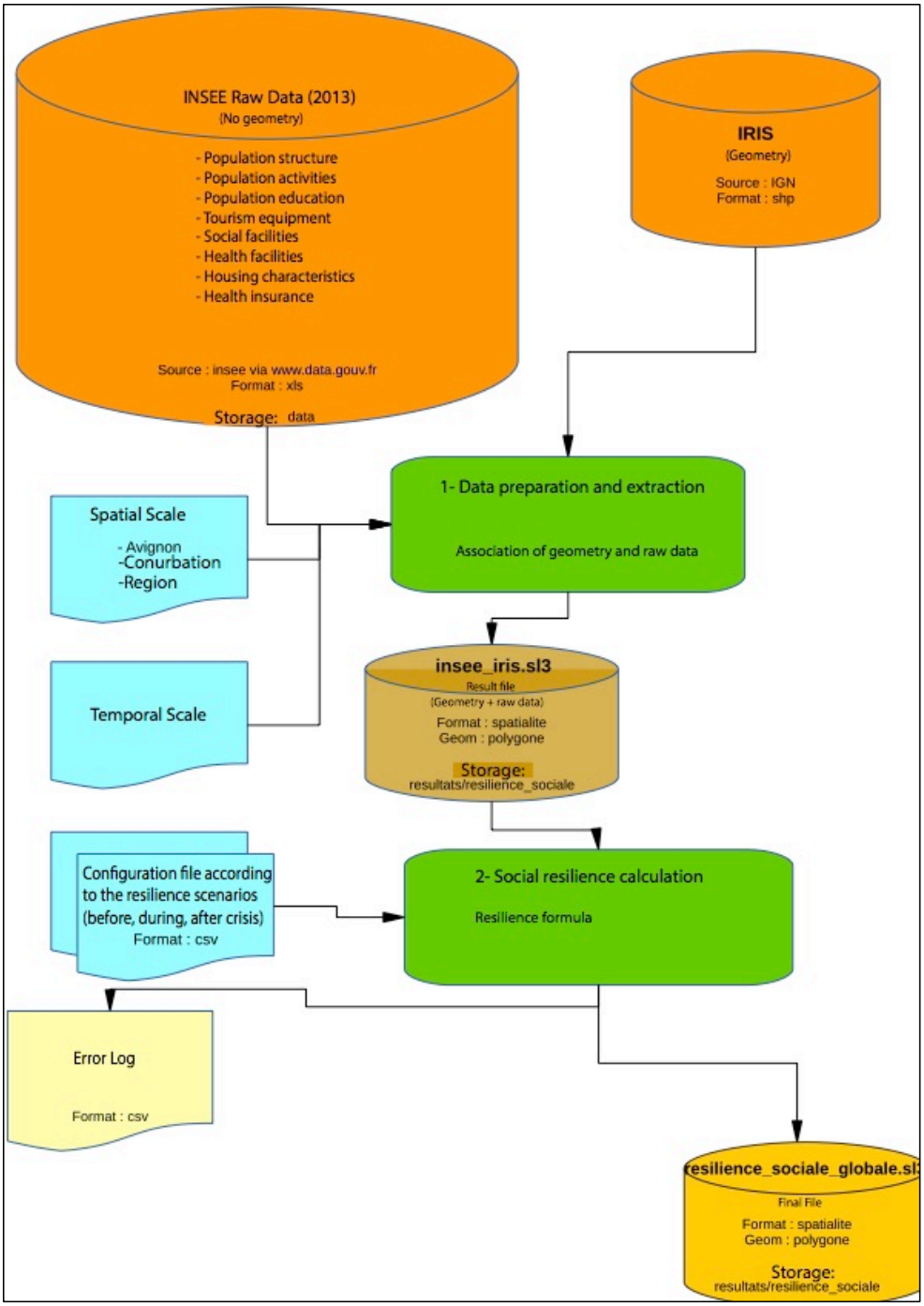

Figure 7: Details of the social resilience assessment process

Once the computer processing was completed, the visualization and analysis work was done via a GIS, namely the QGIS software (Fig.8). It allows the automatic spatialization of data according to data variables or variables

https://doi.org/10.5194/nhess-2019-306
This is just a preview and not the published preprint.
© Author(s) 2019. CC-BY 4.0 License.

Natural Hazards and Earth System Sciences
Discussions
Open Access
EGU

resulting from relationships between objects, and finally the use of graphical tools to visualize and differentiate data (sizes, colors, distances).

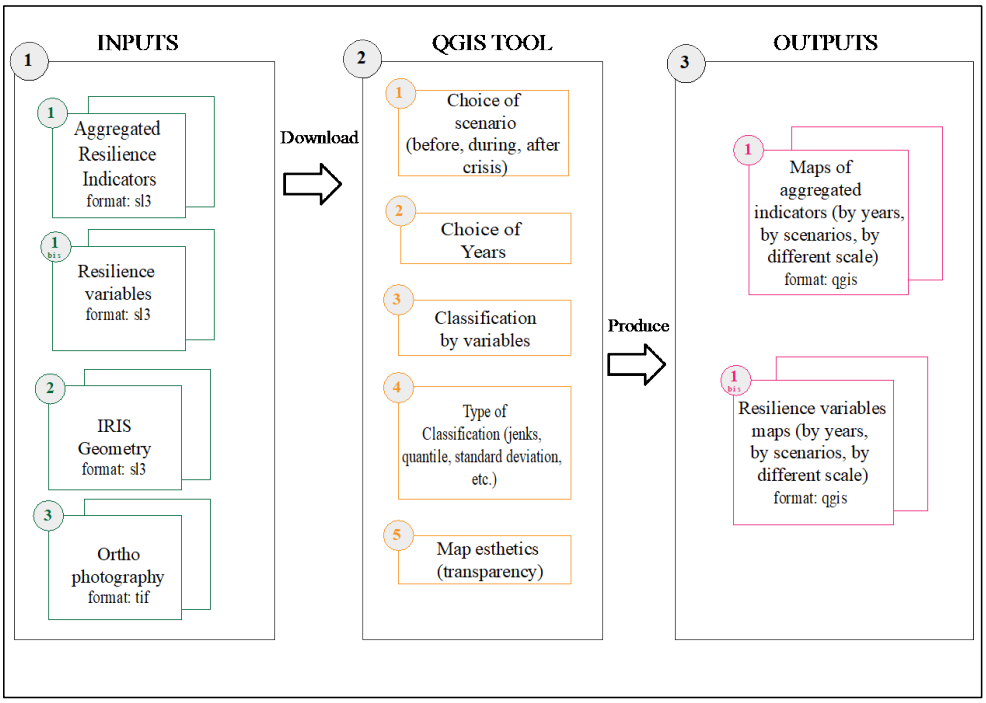

Figure 8: QGIS interaction architecture for resilience assessment.

The map is therefore a decision-making tool in the sense that it represents and filters a mass of data and makes them accessible and comprehensible. But the production of a map cannot in itself be considered a spatial decision support system: its value first depends on the consistency and reliability of the information collected upstream, then on its structuring and effective readability.

4- Testing the resilience model and geovisualization process in Avignon

4.1 Avignon flood issues

Avignon, the chief administrative center of Vaucluse, is faced with flood risks due to its proximity to the confluence of the Rhône and Durance rivers (Fig.9). The island of Barthelasse, the largest river island in Europe, is the area of Avignon most affected by the Rhône's floods. It serves as a buffer between the city and the Rhône, and serves to absorb floods. The few existing dikes protect the island from low floods, but it is still floodable, as shown by the 2-meter floods in 1993, 1994, 2002 and 2003.

https://doi.org/10.5194/nhess-2019-306
This is just a preview and not the published preprint.
© Author(s) 2019. CC-BY 4.0 License.

Natural Hazards and Earth System Sciences
Discussions
Open Access
EGU

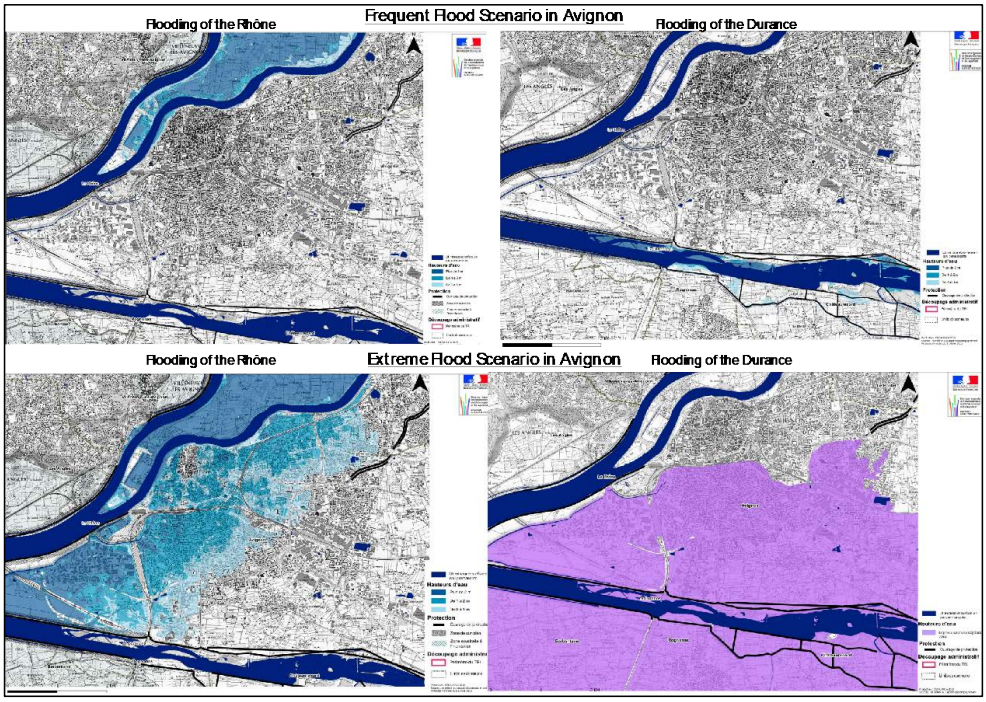

Figure 9: Frequent and extreme flood scenario in Avignon, (Heinzlef et al., 2019) inspired by @ DREAL PACA

Therefore, a spatial decision-support system that integrates resilience in practice would be helpful for a flood-prone community. It was developed in partnership with the Avignon city council GIS Department. This collaboration took place at several levels, both in the involvement of local actors in the study, in the data exchange process, and in the choice of processing tools, to ensure and improve the re-usability of the methodology once the study has been completed. The final choice of resilience variables, data processing, and their final visualization was made in constant collaboration with the city's technical services, to ensure that data and their analyses were shared and understood.

4.2 Resilience to flood assessment in Avignon: a few results

The city was divided into a local scale – IRIS scale – to visualize which areas are resilient or not. The indicators - social (Fig.10), urban and technical- and each variable (Fig.11) included in the model can be visualized. Therefore, it is easier to perceive which variables improve resilient capacities, and which areas have developed these variables or not. As each indicator is independent from each other, it is easier for politicians and managers to work on variables with low levels of resilience and identify areas to be redeveloped and / or reintegrated in urban dynamics.

https://doi.org/10.5194/nhess-2019-306
This is just a preview and not the published preprint.
© Author(s) 2019. CC-BY 4.0 License.

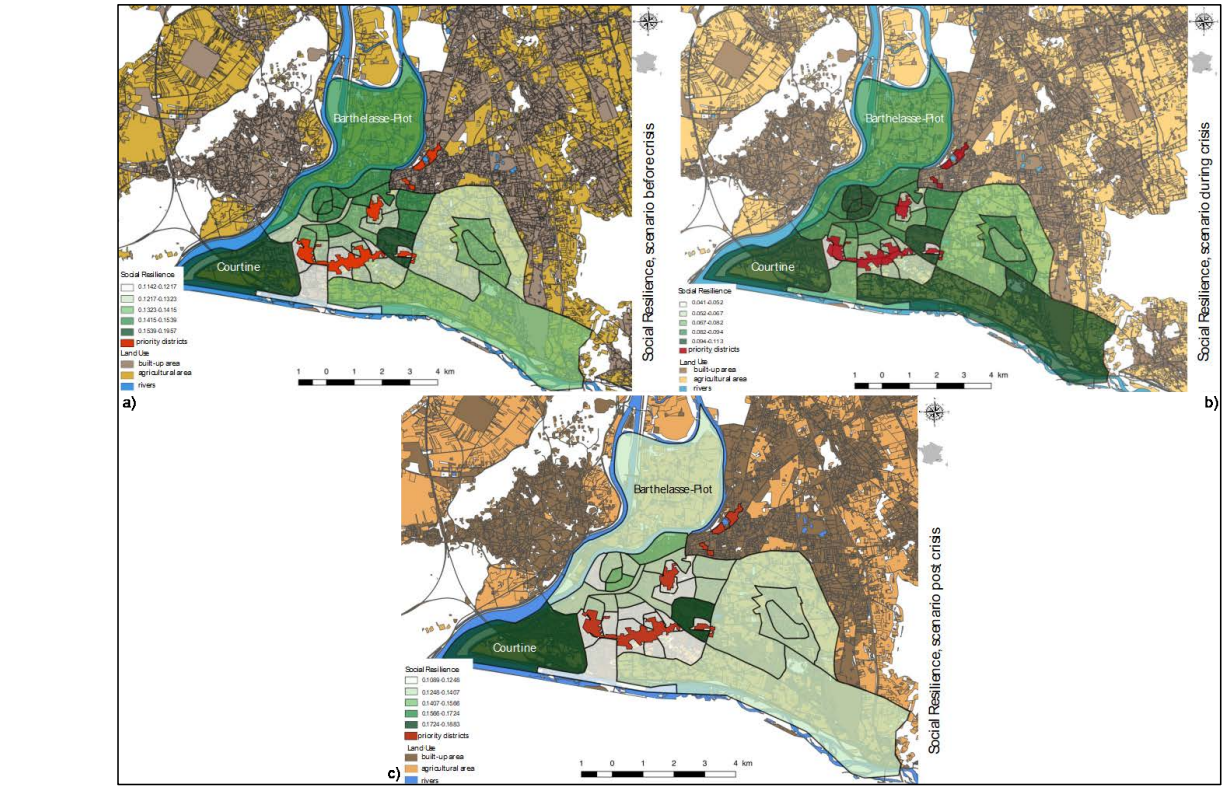

Figure 10: Social Resilience Indicator-Multi scenario, Avignon scale (IRIS scale analysis). The left-hand map identifies the most resilient areas (greener) according to the social resilience characteristics before a crisis; the right-hand map identifies the most resilient areas according to the social characteristics during a crisis; the map below identifies the most resilient areas according to the social characteristics after a crisis - Open Database License, "ODbL" 1.0.

The difference between the three maps in Figure 10 is explained by the different scenarios considered before, during and after a crisis. Not every variable is included in every scenario. For example, age variables are important both before (preparation, knowledge of risk, etc.), during (understanding of the situation, ability to move, etc.), and after the reconstruction process. On the contrary, whether or not individuals have a job does not play a role during the crisis but is decisive afterwards, in order to rebuild and relaunch an activity.

https://doi.org/10.5194/nhess-2019-306
This is just a preview and not the published preprint.
© Author(s) 2019. CC-BY 4.0 License.

Natural Hazards and Earth System Sciences
Discussions

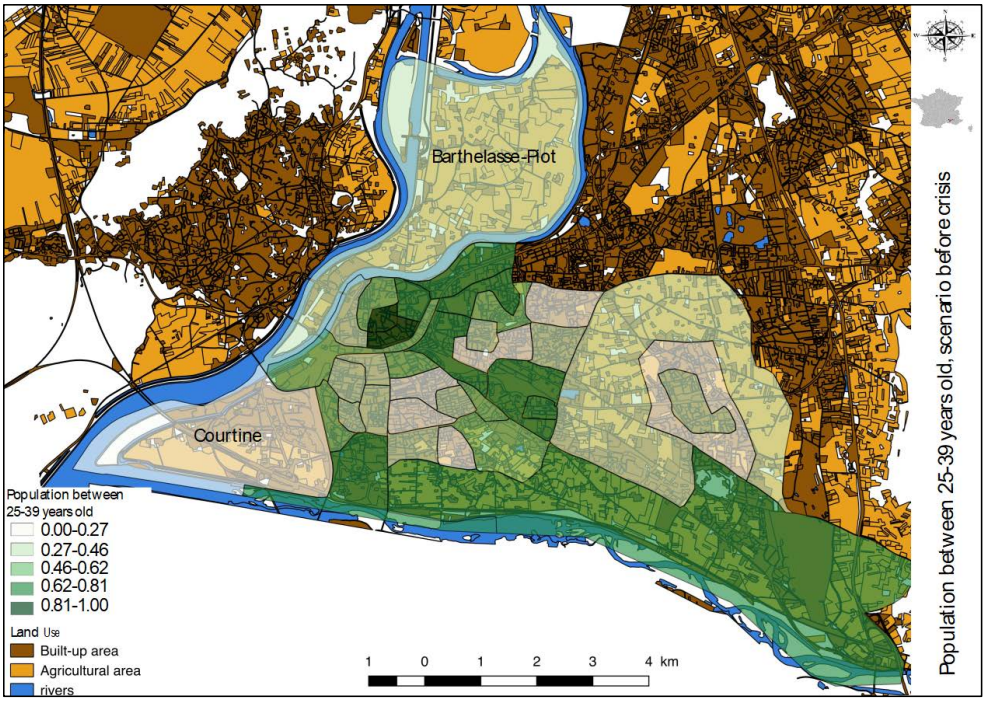

Figure 11: Population between 25 and 39 years old-scenario before crisis, Avignon scale (IRIS scale analysis). The map above identifies the value of the population variable 25-39 years old according to the total IRIS population before a crisis - Open Database License, "ODbL" 1.0.

Figure 11 *shows the location of individuals aged 25 to 39 years, with a segment of the population potentially more resilient, before, during and after. Indeed, they can have a risk culture beforehand, act and survive during, and restart an activity after the disruptive event. They are more prevalent in the city center and in the South and South East. This is mainly due to the location of the two universities, in the city center and outside the city walls, which favors student accommodation and low-cost housing.*

https://doi.org/10.5194/nhess-2019-306
This is just a preview and not the published preprint.
© Author(s) 2019. CC-BY 4.0 License.

Natural Hazards and Earth System Sciences
Discussions

Resilience indicators/ IRIS	Variables	Impact on resilience	Barthelasse	Courtine
Social resilience indicator				
	Population Structure			
	00-02 years old	Negative	0.08	0.28
	25-39 years old	Positive	0.35	0.23
	more than 80 years old	Negative	0.67	1
	Professional situation			
	Active 15-64 years old	Positive	0.69	1
	Unemployed 15-64 years old	Negative	0.40	0.38
	Habits			
	Active people 15 years or older not using transport	Positive	0.59	1
	Active people 15 years or older, using public transport	Positive	0.24	0.08
	Insurances			
	Health insurance beneficiaries	Positive	0.50	0.92
	Beneficiaries of CAF allocations	Positive	0.19	0.93
	Education			
	Exit before the 3rd grade	Negative	0.89	0.02
	Bac +2 and better	Positive	0.55	NULL
Urban resilience indicator	*Buildings*			
	Number of main residences built before 1919	Positive	0.05	0
	Number of main residences built from 1919 to 1945	Negative	0.89	0.99
	Number of main residences built from 1946 to 1970	Negative	0.95	1
	Number of main residences	Negative	0.92	0.97

https://doi.org/10.5194/nhess-2019-306
This is just a preview and not the published preprint.
© Author(s) 2019. CC-BY 4.0 License.

Natural Hazards and Earth System Sciences
Discussions

	built from 1971 to 1990			
	Number of main residences built from 1991 to 2005	Negative	0.02	0.02
	Number of main residences built from 2006 to 2010	Positive	0.01	0.26
	Critical Infrastructures			
	Defense	Positive	NULL	NULL
	Fire and rescue services	Positive	0.12	0.34
	Hospital activities	Positive	0	0.75
	Economic dynamics			
	Tourist and other short-term accommodation	Positive	0.43	0.51
	Creation of new companies	Positive	0.05	0.29
	Removal of companies	Negative	0.93	0.64
Technical resilience indicator	*Diversity of networks*	Positive	0	0.85
	Network accessibility	Positive		
	Accessibility of networks by public road within a 100m radius		0	0.17

Table 2: Variable values - scenario before crisis

Table 2 presents the value of each variable according to the pre-crisis scenario for the IRIS of Barthelasse and Courtine (Tab.2) after Min-Max standardization. These values illustrate the representativeness of each variable in the territory, and make it possible to understand the social and spatial dynamics at the IRIS scale for Barthelasse and Courtine. This detailed analysis, carried out on a variable-by-variable basis, allows engaging in a discussion with local actors in an attempt to reintegrate neighborhoods at the margins of territorial functioning, in order to work on the integration of urban resilience in the face of daily territorial stresses and when confronted by a more exceptional event such as a flood.

Regarding the urban resilience indicator, INSEE data are available from 2009 to 2013, thus making it possible to perform a multi-date analysis over several years (Fig.12) and gain understanding of urban evolutions and resilience trends. For instance, certain elements have evolved, such as the proportion of tourist accommodation, and surgical and hospital activities, thereby increasing resilience capacities.

https://doi.org/10.5194/nhess-2019-306
This is just a preview and not the published preprint.
© Author(s) 2019. CC-BY 4.0 License.

Natural Hazards and Earth System Sciences
Discussions
Open Access
EGU

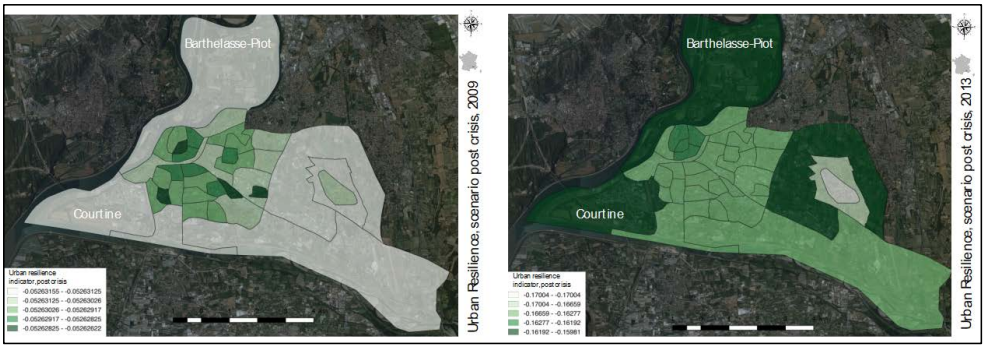

Figure 12: Comparative analysis between 2009 and 2013 for the Urban indicator, post crisis scenario, Avignon scale (IRIS scale analysis). The map on the left identifies the most resilient areas according to the urban characteristics after a crisis in 2009; the map on the right identifies the most resilient areas according to the urban characteristics after a crisis in 2013 - Open Database License, "ODbL" 1.0.

After reflection on the visibility of the results, information sharing, and a neutral and collaborative approach, we are considering making our work accessible to inhabitants by developing a website to continue the risk communication process on flood risks and strengthen the geovisualization process. This website, which is currently subject to reflection, developed with the creation of interactive maps accessible via a web link (http://u.osmfr.org/m/353189/) and a QR code (Fig.13).

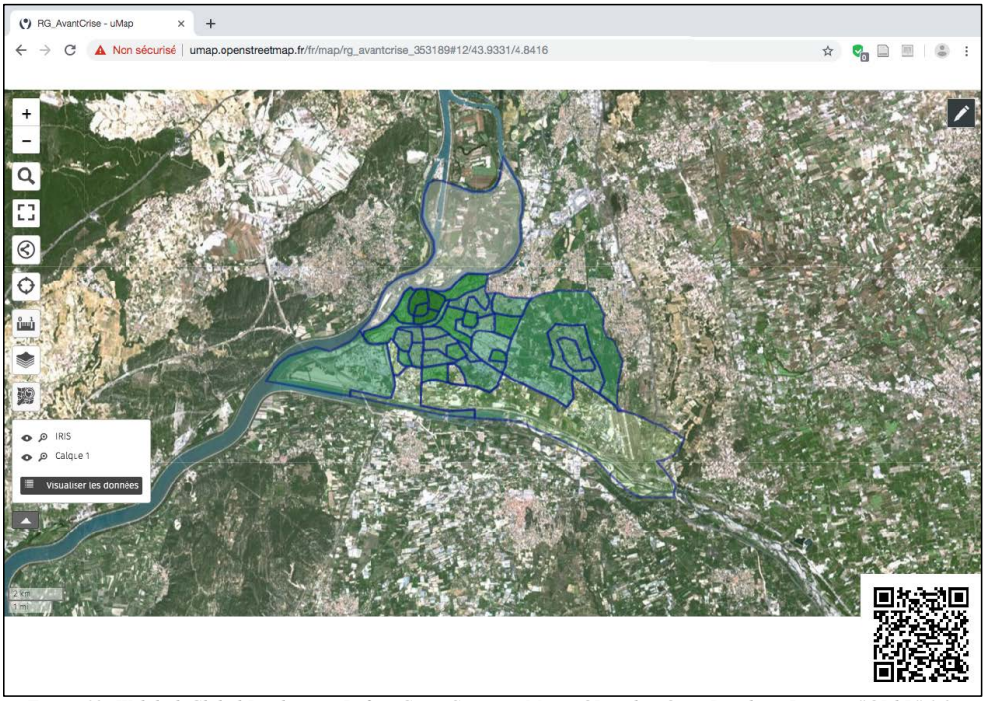

Figure 13: Web link Global Resilience - Before Crisis Scenario Map – QR code - Open Database License, "ODbL" 1.0.

https://doi.org/10.5194/nhess-2019-306
This is just a preview and not the published preprint.
© Author(s) 2019. CC-BY 4.0 License.

Natural Hazards and Earth System Sciences
Discussions

481 Concerning the contribution of geovisualization used to promoter dialogue on the issue of territorial
482 resilience, workshops were organized to develop interaction around the maps produced and the database provided
483 and accessible to stakeholders. These workshops provided an opportunity for scientific experts and critical
484 infrastructure managers as well as decision-makers in risk management strategies to exchange views in order to
485 support the reflection process and foster long-term collaboration. These maps and this new database allowed the
486 actors to extract new knowledge from the decision support tool, especially theoretical knowledge provided by the
487 maps and consistent with the database. This knowledge is both current but also part of a long-term construction,
488 since the data evolve as a function of INSEE production.
489
490 ## 5- Discussion
491
492 This research is at the crossroads of resilience modeling and geovisualization practices based on visualization,
493 data processing, mapping and also the decision support process. Rather than focusing on technological
494 developments, this work attempted to reflect on the accessibility of the methodology and its appropriation by local
495 stakeholders. The results are expressed through maps illustrating the potential for social, urban and technical
496 resilience at the community level. It therefore takes into account a large number of dimensions in making the
497 concept of resilience operational.
498 Several improvements are already being considered to overcome the limitations of this work. Concerning the
499 question of tools, willingness to switch entirely to free tools led to reflection on abandoning the FME tool. The
500 project to build a QGIS plugin is under study in view to increasing accessibility. The advantage of the plugin
501 would be to make the computer script behind the methodology completely free, accessible and downloadable.
502 Another improvement to consider would be to test the approach in other territories, either by developing a
503 partnership of the same scope or by switching the entire process to open data. At present, this analysis can be
504 performed at the scale of the Sud Provence-Alpes Côte d'Azur region (Fig. 14) and at the scale of France, but only
505 for the social resilience indicator.
506

https://doi.org/10.5194/nhess-2019-306
This is just a preview and not the published preprint.
© Author(s) 2019. CC-BY 4.0 License.

Natural Hazards and Earth System Sciences
Discussions
Open Access
EGU

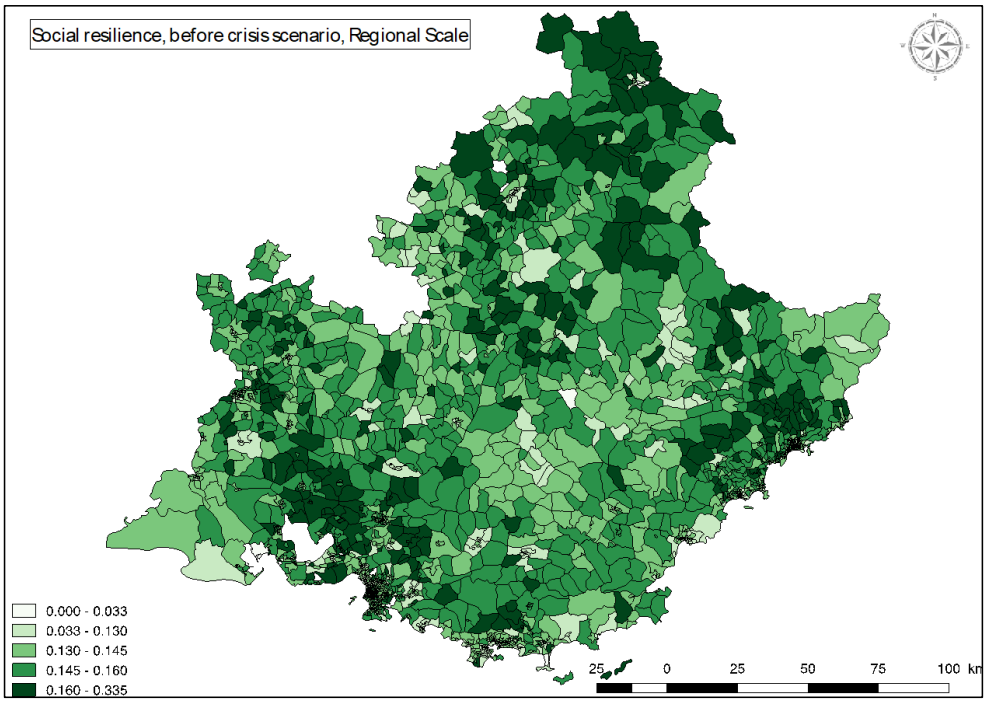

Figure 14: Social resilience, before crisis scenario, Provence-Alpes-Côte d'Azur regional scale - Open Database License, "ODbL" 1.0.

Following theoretical modeling and visual, cartographic and geovisualized production work, further development included the organization of workshops to question users on their understanding and use of the tool and the results. These workshops took place with critical infrastructure managers and made it possible to (re)launch the debate around the issue of resilience and thus to build knowledge without hypothesis a priori (Maceachren and Kraak, 1997) around a tool for visualizing a concept that is difficult to put into practice.

This modeling and cartographic production work based on geovisualization has made it possible to rethink the issue of urban resilience. The mapping results led to workshops to review and compare the methodology with the reality of the territory and risk management practices. This work is part of a broader dynamic and reflection on the question of operationalizing resilience. Based on the results of this decision-making tool designed to operationalize urban resilience, a more global project is now under construction. It is thus planned to use these results to build an urban resilience observatory that will be tested on the island territories of French Polynesia. This will provide an opportunity to merge representations of risks, territories and techniques for data processing, production and analysis, visualization, and collaboration with local actors.

6- Conclusion

https://doi.org/10.5194/nhess-2019-306
This is just a preview and not the published preprint.
© Author(s) 2019. CC-BY 4.0 License.

Natural Hazards and Earth System Sciences
Discussions

This article proposed a methodology intended to clarify the concept of resilience in the context of increasing urban flooding. This methodology is divided into two stages. First, the modeling and analysis of the concept of resilience through the formulation of three definitions and measurement indicators in order to approach resilience in an exhaustive way on the basis of social, technical and urban criteria. Secondly, we used geovisualization techniques (mapping practices, visualization, data processing and analysis, map processing) to build a spatial decision support system accessible and understandable to local stakeholders in the Avignon community. This spatial decision support system sought to provide a simple and accessible methodology to quickly verify and analyze information for decision-making. The aim is to use the principles of visualization of geovisualization to widely disseminate map results in order to improve resilience culture. The contributions and innovations of this work are therefore of several kinds:

- the design of a spatial decision support system with and for local actors;
- the design of a resilience model;
- the use of open access data to enhance INSEE data and match the knowledge of local actors;
- the use of tools to highlight the visualization of data processing: FME and QGIS;
- the use of free and easy to use tools to perform advanced mapping processing;
- the implementation of dialogue between local experts and actors through visual and understandable cartographic production.

The advances achieved have made it possible to map resilience at the local level, ensure that local actors are understood, and that the methodology is accessible to non-experts and reproducible. The method therefore focuses on the accessibility promoted by geovisualization techniques rather than on technicality.

While some limitations have been observed - in particular regarding the non-exhaustiveness of open access tools, the need to include local actors from the outset and changes of scale - many perspectives are already being considered for the future. The first step has been taken to switch all the tools to open access via the development of a QGIS plugin. In addition to the response to the tools, this plugin will also integrate the reflections of different actors in order to develop the tool using the feedback expressed. Regarding the issue of scale, the need to go beyond the national framework was expressed through reflection on the use of Open Street Map data. Finally, regarding the form of this spatial decision-making tool itself, work is in progress to develop it by setting up a Resilience Observatory for the island territories of French Polynesia. Studies and analyses are being carried out to this end.

References

100 Resilient Cities, n.d. The City Resilience Framework.

Aerts, J.C.J.H., Lin, N., Botzen, W., Emanuel, K., de Moel, H.. Low-Probability Flood Risk Modeling for New York City: Low-Probability Flood Risk Modeling for New York City. Risk Anal. 33, 772–788, https://doi.org/10.1111/risa.12008, 2013.

Apel, H., Aronica, G.T., Kreibich, H., Thieken, A.H. Flood risk analyses—how detailed do we need to be? Nat. Hazards 49, 79–98,. https://doi.org/10.1007/s11069-008-9277-8, 2009

https://doi.org/10.5194/nhess-2019-306
This is just a preview and not the published preprint.
© Author(s) 2019. CC-BY 4.0 License.

Natural Hazards and Earth System Sciences
Discussions

572
573 Bakkensen, L.A., Fox-Lent, C., Read, L.K., Linkov, I. Validating Resilience and Vulnerability Indices in
574 the Context of Natural Disasters: Validating Resilience and Vulnerability Indices. Risk Anal. 37, 982–
575 1004, https://doi.org/10.1111/risa.12677, 2017.
576
577 Barroca, B., Serre, D. Risks revealed by cartography – cartography renewed by the geovisualization of
578 risks. Int. J. Cartogr. 4, 1–3, https://doi.org/10.1080/23729333.2018.1444376, 2018.
579
580 Bathrellos, G.D., Gaki-Papanastassiou, K., Skilodimou, H.D., Papanastassiou, D., Chousianitis, K.G.
581 Potential suitability for urban planning and industry development using natural hazard maps and
582 geological–geomorphological parameters. Environ. Earth Sci. 66, 537–548,
583 https://doi.org/10.1007/s12665-011-1263-x, 2012.
584
585 Burby, R. Flood insurance and floodplain management: the US experience. Glob. Environ. Change Part B
586 Environ. Hazards 3, 111–122, https://doi.org/10.1016/S1464-2867(02)00003-7, 2001.
587
588 Callon, M., Lascoumes, P., Barthe, Y. Agir dans un monde incertain : essai sur la démocratie technique, La
589 couleur des idées. Editions du Seuil, Paris, 2001.
590
591 Casadio Tarabusi, E., Guarini, G. An Unbalance Adjustment Method for Development Indicators. Soc.
592 Indic. Res. 112, 19–45, https://doi.org/10.1007/s11205-012-0070-4, 2013.
593
594 Chinh, D.T., Bubeck, P., Dung, N.V., Kreibich, H. The 2011 flood event in the Mekong Delta: preparedness,
595 response, damage and recovery of private households and small businesses. Disasters 40, 753–778,
596 https://doi.org/10.1111/disa.12171, 2016.
597
598 Cutter, S.L. The landscape of disaster resilience indicators in the USA. Nat. Hazards 80, 741–758,
599 https://doi.org/10.1007/s11069-015-1993-2, 2016.
600
601 Cutter, S.L., Barnes, L., Berry, M., Burton, C., Evans, E., Tate, E., Webb, J. A place-based model for
602 understanding community resilience to natural disasters. Glob. Environ. Change 18, 598–606,
603 https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.07.013, 2008.
604
605 Cutter, S.L., Burton, C.G., Emrich, C.T. Disaster Resilience Indicators for Benchmarking Baseline
606 Conditions. J. Homel. Secur. Emerg. Manag. 7, https://doi.org/10.2202/1547-7355.1732, 2010.
607
608 Cutter, S.L., Finch, C. Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards. Proc. Natl.
609 Acad. Sci. 105, 2301–2306, 2008.
610
611 de Moel, H., Jongman, B., Kreibich, H., Merz, B., Penning-Rowsell, E., Ward, P.J. Flood risk assessments
612 at different spatial scales. Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change 20, 865–890,
613 https://doi.org/10.1007/s11027-015-9654-z, 2015.
614
615 Donolo, R.M. Contributions to geovisualization for territorial intelligence. Institut National des Sciences
616 Appliquées de Lyon/ Universita degli studi di Roma tor Vergata, 2014.
617
618 Elmer, F., Hoymann, J., Düthmann, D., Vorogushyn, S., Kreibich, H. Drivers of flood risk change in
619 residential areas. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 12, 1641–1657, https://doi.org/10.5194/nhess-12-1641-
620 2012, 2012.
621
622 Ernst, J., Dewals, B.J., Detrembleur, S., Archambeau, P., Erpicum, S., Pirotton, M. Micro-scale flood risk
623 analysis based on detailed 2D hydraulic modelling and high resolution geographic data. Nat. Hazards 55,
624 181–209, https://doi.org/10.1007/s11069-010-9520-y, 2010.
625
626 Esty, D.C., Levy, M., Srebotnjak, T., de Sherbinin, A. 2005 Environmental Sustainability Index:
627 Benchmarking National Environmental Stewardship. Yale Center for Environmental Law and Policy,
628 New Haven, 2005.
629
630 European Environment Agency. Economic losses from climate-related extremes in Europe. European
631 Environment Agency, Copenhagen, 2019.

https://doi.org/10.5194/nhess-2019-306
This is just a preview and not the published preprint.
© Author(s) 2019. CC-BY 4.0 License.

Natural Hazards and Earth System Sciences
Discussions

Fekete, A. Validation of a social vulnerability index in context to river-floods in Germany. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 9, 393–403, https://doi.org/10.5194/nhess-9-393-2009, 2009.

Fox-Lent, C., Bates, M.E., Linkov, I. A matrix approach to community resilience assessment: an illustrative case at Rockaway Peninsula. Environ. Syst. Decis. 35, 209–218, https://doi.org/10.1007/s10669-015-9555-4, 2015.

Frazier, T.G., Thompson, C.M., Dezzani, R.J., Butsick, D. Spatial and temporal quantification of resilience at the community scale. Appl. Geogr. 42, 95–107, https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.05.004, 2013.

Gardner, G. The City: A System of Systems, in: State of the World. Island Press/Center for Resource Economics, Washington, DC, pp. 27–44, https://doi.org/10.5822/978-1-61091-756-8_3, 2016.

Garschagen, M. Risky Change? Vietnam's Urban Flood Risk Governance between Climate Dynamics and Transformation. Pac. Aff. 88, 599–621, https://doi.org/10.5509/2015883599, 2015.

Garschagen, M., Romero-Lankao, P. Exploring the relationships between urbanization trends and climate change vulnerability. Clim. Change 133, 37–52, https://doi.org/10.1007/s10584-013-0812-6, 2015.

Gaslikova, L., Schwerzmann, A., Raible, C.C., Stocker, T.F. Future storm surge impacts on insurable losses for the North Sea region. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 11, 1205–1216, https://doi.org/10.5194/nhess-11-1205-2011, 2011.

Gerl, T., Bochow, M., Kreibich, H. Flood Damage Modeling on the Basis of Urban Structure Mapping Using High-Resolution Remote Sensing Data. Water 6, 2367–2393, https://doi.org/10.3390/w6082367, 2014.

Golz, S., Schinke, R., Naumann, T. Assessing the effects of flood resilience technologies on building scale. Urban Water J. 12, 30–43, https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.939090, 2015.

Heinzlef, C., Becue, V., Serre, D. Operationalizing urban resilience to floods in embanked territories – Application in Avignon, Provence Alpes Côte d'azur region. Saf. Sci. 118, 181–193, https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.05.003, 2019.

Holand, I.S., Lujala, P., Rød, J.K. Social vulnerability assessment for Norway: A quantitative approach. Nor. Geogr. Tidsskr. - Nor. J. Geogr. 65, 1–17, https://doi.org/10.1080/00291951.2010.550167, 2011.

Jacobs, K., Garfin, G., Lenart, M. More than Just Talk: Connecting Science and Decisionmaking. Environ. Sci. Policy Sustain. Dev. 47, 6–21, https://doi.org/10.3200/ENVT.47.9.6-21, 2005.

Johansson, J., Opach, T., Glaas, E., Neset, T., Navarra, C., Linner, B.-O., Rod, J.K. VisAdapt: A visualization tool to support climate change adaptation. IEEE Comput. Graph. Appl. 1–1, https://doi.org/10.1109/MCG.2016.49, 2016.

Jovanovic, A., Øien, K., Choudhary, A. An Indicator-Based Approach to Assessing Resilience of Smart Critical Infrastructures, in: Urban Disaster Resilience and Security. Springer, p. p.285-311, 2018.

Klein, R.J.T., Nicholls, R.J., Thomalla, F. Resilience to natural hazards: How useful is this concept? Environ. Hazards 5, 35–45, https://doi.org/10.1016/j.hazards.2004.02.001, 2003.

Kraak, M.-J. Geovisualization illustrated. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 57, 390–399, https://doi.org/10.1016/S0924-2716(02)00167-3, 2003.

Leskens, J.G., Brugnach, M., Hoekstra, A.Y., Schuurmans, W. Why are decisions in flood disaster management so poorly supported by information from flood models? Environ. Model. Softw. 53, 53–61, https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.11.003, 2014.

Lhomme, S. Les réseaux techniques comme vecteur de propagation des risques en milieu urbain. Une

https://doi.org/10.5194/nhess-2019-306
This is just a preview and not the published preprint.
© Author(s) 2019. CC-BY 4.0 License.

Natural Hazards and Earth System Sciences
Discussions

691 contribution théorique et pratique à l'analyse de la résilience urbaine, Université Paris Diderot, Paris,
692 2014.
693
694 Lhomme, S., Serre, D., Diab, Y., Laganier, R. Analyzing resilience of urban networks: a preliminary step
695 towards more flood resilient cities. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 13, 221–230,
696 https://doi.org/10.5194/nhess-13-221-2013, 2013.
697
698 Linkov, I., Bridges, T., Creutzig, F., Decker, J., Fox-Lent, C., Kröger, W., Lambert, J.H., Levermann, A.,
699 Montreuil, B., Nathwani, J., Nyer, R., Renn, O., Scharte, B., Scheffler, A., Schreurs, M., Thiel-Clemen,
700 T. Changing the resilience paradigm. Nat. Clim. Change 4, 407, 2014.
701
702 Löwe, R., Urich, C., Kulahci, M., Radhakrishnan, M., Deletic, A., Arnbjerg-Nielsen, K. Simulating flood
703 risk under non-stationary climate and urban development conditions – Experimental setup for multiple
704 hazards and a variety of scenarios. Environ. Model. Softw. 102, 155–171.
705 https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.01.008, 2018.
706
707 MacEachren, A.M., Gahegan, M., Pike, W., Brewer, I., Cai, G., Lengerich, E., Hardisty, F. Geovisualization
708 for Knowledge Construction and Decision Support. IEEE Comput. Graph. Appl. 24, 13–17, 2004.
709
710 MacEachren, A.M., Kraak, M.-J. Research Challenges in Geovisualization. Cartogr. Geogr. Inf. Sci. 28, 3–
711 12, https://doi.org/10.1559/152304001782173970, 2001.
712
713 Maceachren, A.M., Kraak, M.-J. Exploratory cartographic visualization: Advancing the agenda. Comput.
714 Geosci. 23, 335–343, https://doi.org/10.1016/S0098-3004(97)00018-6, 1997.
715
716 Meyer, V., Scheuer, S., Haase, D. A multicriteria approach for flood risk mapping exemplified at the Mulde
717 river, Germany. Nat. Hazards 48, 17–39, https://doi.org/10.1007/s11069-008-9244-4, 2009.
718
719 Moser, S.C. Impact assessments and policy responses to sea-level rise in three US states: An exploration of
720 human-dimension uncertainties. Glob. Environ. Change 15, 353–369,
721 https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2005.08.002, 2005.
722
723 Næss, L.O., Norland, I.T., Lafferty, W.M., Aall, C. Data and processes linking vulnerability assessment to
724 adaptation decision-making on climate change in Norway. Glob. Environ. Change 16, 221–233,
725 https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.01.007, 2006.
726
727 Opach, T., Rød, J.K. Cartographic Visualization of Vulnerability to Natural Hazards. Cartogr. Int. J. Geogr.
728 Inf. Geovisualization 48, 113–125, https://doi.org/10.3138/carto.48.2.1840, 2013.
729
730 Patil, V.H., Singh, S.N., Mishra, S., Todd Donavan, D. Efficient theory development and factor retention
731 criteria: Abandon the "eigenvalue greater than one" criterion. J. Bus. Res. 61, 162–170,
732 https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2007.05.008, 2008.
733
734 Patt, A., Dessai, S. Communicating uncertainty: lessons learned and suggestions for climate change
735 assessment. Comptes Rendus Geosci. 337, 425–441, https://doi.org/10.1016/j.crte.2004.10.004, 2005.
736
737 Prior, T., Hagmann, J. Measuring resilience: methodological and political challenges of a trend security
738 concept. J. Risk Res. 17, 281–298, https://doi.org/10.1080/13669877.2013.808686, 2014.
739
740 Radhakrishnan, M., Pathirana, A., Ashley, R., Zevenbergen, C. Structuring Climate Adaptation through
741 Multiple Perspectives: Framework and Case Study on Flood Risk Management. Water 9, 129,
742 https://doi.org/10.3390/w9020129, 2017.
743
744 Schinke, R., Kaidel, A., Golz, S., Naumann, T., López-Gutiérrez, J., Garvin, S. Analysing the Effects of
745 Flood-Resilience Technologies in Urban Areas Using a Synthetic Model Approach. ISPRS Int. J. Geo-
746 Inf. 5, 202, https://doi.org/10.3390/ijgi5110202, 2016.
747
748 Schinke, R., Neubert, M., Hennersdorf, J., Stodolny, U., Sommer, T., Naumann, T. Damage estimation of
749 subterranean building constructions due to groundwater inundation – the GIS-based model approach
750 GRUWAD. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 12, 2865–2877, https://doi.org/10.5194/nhess-12-2865-2012,

https://doi.org/10.5194/nhess-2019-306
This is just a preview and not the published preprint.
© Author(s) 2019. CC-BY 4.0 License.

Natural Hazards and Earth System Sciences
Discussions

2012.

Schumann, G., Di Baldassarre, G., Bates, P.D. The Utility of Spaceborne Radar to Render Flood Inundation Maps Based on Multialgorithm Ensembles. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 47, 2801–2807, https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2017937, 2009.

Serre, D. DS3 Model Testing: Assessing Critical Infrastructure Network Flood Resilience at the Neighbourhood Scale, in: Fekete, A., Fiedrich, F. (Eds.), Urban Disaster Resilience and Security. Springer International Publishing, Cham, pp. 207–220, https://doi.org/10.1007/978-3-319-68606-6_13, 2018.

Serre, D. Advanced methodology for risk and vulnerability assessment of interdependency of critical infrastructure in respect to urban floods. E3S Web Conf. 7, 7002, https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160707002, 2016.

Serre, D., Barroca, B., Balsells, M., Becue, V. Contributing to urban resilience to floods with neighbourhood design: the case of Am Sandtorkai/Dalmannkai in Hamburg. J. Flood Risk Manag, https://doi.org/10.1111/jfr3.12253, 2016.

Serre, D., Barroca, B., Diab, Y. Urban flood mitigation: sustainable options. Presented at the THE SUSTAINABLE CITY 2010, La Coruna, Spain, pp. 299–309, https://doi.org/10.2495/SC100261, 2010.

Serre, D., Heinzlef, C. Assessing and mapping urban resilience to floods with respect to cascading effects through critical infrastructure networks. Int. J. Disaster Risk Reduct, https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.02.018, 2018.

Singh-Peterson, L., Salmon, P., Goode, N., Gallina, J. Translation and evaluation of the Baseline Resilience Indicators for Communities on the Sunshine Coast, Queensland Australia. Int. J. Disaster Risk Reduct. 10, 116–126, https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2014.07.004, 2014.

Suárez, M., Gómez-Baggethun, E., Benayas, J., Tilbury, D. Towards an Urban Resilience Index: A Case Study in 50 Spanish Cities. Sustainability 8, 774, https://doi.org/10.3390/su8080774, 2016.

Tierney, K.J. The social roots of risk: producing disasters, promoting resilience, High reliability and crisis management. Stanford Business Books, an imprint of Stanford University Press, Stanford, California, 2014.

Tierney, K.J., Lindell, M.K., Perry, R.W. Facing the unexpected: disaster preparedness and response in the United States. Joseph Henry Press, Washington, D.C, 2001.

UNISDR-United Nations International Strategy for Disaster Reduction. Terminology on disaster risk reduction. Geneva, 2009.

Vorogushyn, S., Lindenschmidt, K.-E., Kreibich, H., Apel, H., Merz, B. Analysis of a detention basin impact on dike failure probabilities and flood risk for a channel-dike-floodplain system along the river Elbe, Germany. J. Hydrol. 436–437, 120–131, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.03.006, 2012.

Wallemacq, P., House, R. Economic losses, poverty and disasters: 1998-2017. Center for Research on the Epidemiology of Disaster (CRED), UNISDR, 2018.

Ward, P.J., de Moel, H., Aerts, J.C.J.H. How are flood risk estimates affected by the choice of return-periods? Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 11, 3181–3195, https://doi.org/10.5194/nhess-11-3181-2011, 2011.

Yasobant, S., Vora, K.S., Hughes, C., Upadhyay, A., Mavalankar, D.V. Geovisualization: A Newer GIS Technology for Implementation Research in Health. J. Geogr. Inf. Syst. 7, 20–28, https://doi.org/10.4236/jgis.2015.71002, 2015.

3.2. Les techniques de géovisualisation pour élaborer un système spatial d'aide à la décision : apports et limites

Cet article propose une méthodologie visant à répondre à la limite de l'opérationnalisation de la résilience à travers deux approches. La première a permis d'analyser, définir et modéliser le concept de résilience autour de la création de trois indicateurs, social, urbain et technique. Suite à la construction de ce modèle conceptuel, la méthodologie a mobilisé les techniques de géovisualisation (méthodes de cartographie, de visualisation, d'analyse de données, etc.) afin de répondre aux limites liées à l'abstraction du concept.

Les deux approches ont permis de construire un outil spatial d'aide à la décision exhaustif et collaboratif. Les apports de l'étude permettent de clarifier l'acquisition des données (grâce à la mise en valeur de données nationales en libre accès), leur transformation et leur analyse (à l'aide de l'utilisation d'outils attractifs et faciles d'utilisation grâce à leur interface dynamique), et la production de résultats (résultats cartographiques établis à l'aide d'outils en libre accès).

Les avancées ont permis de cartographier un potentiel de résilience à l'échelle locale. En outre, l'utilisation des techniques de visualisation a permis de s'assurer que la méthodologie était compréhensible et ré-applicable par les acteurs locaux. La méthodologie met davantage en lumière l'accessibilité, la reproductibilité et la compréhension que la technicité des traitements et des résultats.

D'autre part, grâce à la production visuelle et compréhensible des résultats cartographiques, un dialogue soutenu s'est construit entre experts scientifiques et aménageurs locaux. La co-construction d'une connaissance autour des risques et de la résilience, ainsi que des échanges entre savoirs théoriques et pratiques, permettent de disséminer une culture du risque plus adaptée aux incertitudes liées au changement climatique. Grâce à l'intégration du concept de résilience, les stratégies de gestion du risque inondation sont donc plus adéquates. La dernière étape essentielle est dès lors de construire un cadre d'échanges et de partage autour des perceptions, compréhensions, connaissances et expériences de la résilience urbaine sur un territoire soumis à des risques.

4. « Operating urban resilience strategies to face climate change and associated risks: some advances from theory to application in Canada and France »

Statut de l'article n°4 : En cours d'évaluation dans *Cities*, Septembre 2019

◊ Heinzlef, C., Robert B., Hémond Y., Serre D. "Operating urban resilience strategies to face climate change and associated risks: some advances from theory to application in Canada and France". Cities, in review (2019)

4.1. Conception d'outils d'opérationnalisation de résilience : contexte

Comme évoqué dans les parties précédents, les incertitudes face au dérèglement climatique et à l'augmentation des catastrophes ont entraîné un renouvellement dans les pratiques de gestion des risques en intégrant le concept de résilience. Autrefois révolutionnaire, aujourd'hui à la mode, la résilience est un concept difficile à transformer en un outil intégré que les intervenants acceptent et adoptent. Face à cette difficile traduction en pratiques d'aménagement, plusieurs recherches ont tenté de pallier au manque d'opérationnalité du concept. De manière dichotomique, deux approches se dégagent, l'une tournée vers une vision technico-fonctionnelle d'un territoire résilient, l'autre tentant d'aborder la résilience via une démarche plus globale.

Cet article offre une perspective sur les différentes interprétations de la résilience, sa mise en œuvre difficile et les outils qui cherchent à la rendre opérationnelle. Les questions sous-jacentes concernent l'appropriation de ces outils par les acteurs en charge des territoires et des risques, et comment le concept théorique peut être traduit en stratégies d'intégration du risque inondation dans les territoires. Cet article expose deux approches - organisationnelle (Canada) et globale (France) - qui visent à opérationnaliser la résilience. Ces approches théoriques ont été combinées pour créer des ateliers pour les gestionnaires urbains afin qu'ils puissent passer des résultats théoriques aux applications pratiques.

Rôle	Auteurs
Conceptualisation	Charlotte Heinzlef, Benoît Robert, Yannick Hémond, Damien Serre
Méthodologie	Charlotte Heinzlef, Benoît Robert, Yannick Hémond, Damien Serre
Investigation	Charlotte Heinzlef, Benoît Robert, Yannick Hémond, Damien Serre
Ecriture, papier original	Charlotte Heinzlef
Ecriture - modifications	Charlotte Heinzlef, Benoît Robert, Yannick Hémond, Damien Serre

Supervision	Damien Serre, Benoît Robert, Yannick Hémond
Administration du projet	Damien Serre, Benoît Robert

Operating urban resilience strategies to face climate change and associated risks: some advances from theory to application in Canada and France

Charlotte Heinzlef [1,2], Benoît Robert [3], Yannick Hémond [3], Damien Serre [4]

[1] UMR 7300 ESPACE – University of Avignon, 74, rue Louis Pasteur – Case 19 – 84029 Avignon Cedex 1 – France
[2] University of Mons, Faculty of Architecture and Urban Planning Rue d'Havré 88, 7000, Mons, Belgium
[3] Department of Mathematics and Industrial Engineering, École Polytechnique de Montréal, 2900 Boulevard Edouard-Montpetit, Montreal, QC H3T 1J4, Canada
[4] EIO – Ecosystèmes Insulaires Océaniens (UMR 241), French Polynesia University, Punaauia – B.P. 6570 – 98702 Faa'a – Tahiti – French Polynesia

Abstract

Faced with increasing urbanization and uncertainties linked to climate change, the scientific community has integrated the concept of resilience into urban management practices. Once revolutionary, now a buzzword, resilience is a concept that is difficult to transform into an integrated tool that stakeholders accept and adopt. This paper offers a perspective on the different interpretations of resilience, its difficult implementation and the tools that seek to operationalize it. The underlying questions are how these tools are appropriated by urban planners and territorial decision-makers, and how the theoretical concept can be translated into resilient urban development. This research paper reviews the work on resilience and investigates its use and operationalization, comparing two different approaches – organizational (Canada) and holistic (France) – that aim to clarify and operationalize resilience. These theoretical approaches have been combined to create workshops for urban planners so they can move from theoretical results to practical applications.

Key words: Resilience issues, Climate Change, Collaborative workshops, Spatial-decision support systems

1 Introduction

Between 1995 and 2019, climate-related hazards became more frequent and intense. The Center for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) Emergency Events Database recorded 6,457 weather- or climate-related disasters during this period, claiming 606,000 lives and affecting 4 billion people (UNISDR and

CRED, 2015). It is well known that climate change has increased both the frequency (14% greater than in the decade 1980–1989) and the severity of certain extreme weather-related events such as heavy precipitation, storms and floods, and this trend is projected to continue (European Environment Agency, 2017).

The impacts of this situation are significant, both for the populations affected and for current or future economic, urban, international, and political challenges. Floods represent 47% of all weather-related disasters (with an average of 171 per year in the period from 2005 to 2014, up from an annual average of 127 in the previous decade) and affect 2.3 billion people (UNISDR and CRED, 2015). Among other things, this dramatic trend can be explained by the changing nature of floods, with flash floods and coastal floods becoming increasingly frequent. Moreover, urbanization has led to an increase in flood runoff, affecting urban areas where the stakes are particularly high. In addition to creating new kinds of risk, urbanization has important implications for exposure and vulnerability to extreme events (Field and Intergovernmental Panel on Climate Change, 2012).

Moreover, modern threats and risks are transboundary (Boin et al., 2010), as globalization is creating a connected world, where interactions between territories, societies and issues lead to many interdependencies (Serre, 2018; Serre and Heinzlef, 2018). The interconnected architecture of modern cities' economic, social, political, commercial, administrative and other activities and the globalized world are creating interdependent networks, both formal (technical networks) and informal (functioning in interrelated societies). According to the concept of the domino effect (Nones and Pescaroli, 2016; Pescaroli and Kelman, 2017; Pescaroli and Nones, 2016; Robert et al., 2008; Serre and Heinzlef, 2018) – a chain reaction causing changes in a territory – some areas may be affected by a flood, for example, even if they are not located directly in the risk area. Finally, the presence of critical infrastructures in cities complicates their functioning and crisis management. These critical infrastructures (CIs) are defined as vital to the point that their destruction or incapacity would significantly weaken defense, economic security or overall functioning on the territory.

Faced with this rapid urbanization and the emergence of these new risks, managers must deal with a series of uncertainties. These uncertainties, linked to climate change (Adger and Brooks, 2003), urbanization, system complexity, and the emergence of new actors and new risks complicate urban risk management. How should these uncertainties be managed? Our incomplete understanding of the natural systems associated with human behavior makes it more difficult to understand risks. Aware of these growing uncertainties, experts and scientists have questioned risk management strategies and gradually integrated the concept of resilience. In recent years, resilience has become a major focus in such fields as politics, economics, sports and natural disaster management (Comfort et al., 2010). However, the transition between these different themes has transformed this innovative concept into a mere buzzword (Brand and Jax, 2007; Linkov et al., 2014), used everywhere and by everyone. The overuse of this concept can be explained by its diverse academic roots (De Bruijne et al., 2010); it is applied in domains as varied as physics, psychology, ecology and risk management. The many uses of the concept (Cyrulnik, 2004; Holling, 1973; Koffi, 2014) have made it seem more abstract. However, despite the multitude of definitions (Meerow et al., 2016), the concept is applied in many political, ecological and risk management discourses, as an injunction to systems to be resilient.

In the chaos of these growing uncertainties, the concept of resilience is an interesting approach to understanding the responses of systems and actors to the challenges posed by natural disasters (Fuchs and Thaler, 2018). Resilience can be defined as the ability of populations, territories and infrastructure to develop the resources, skills and capacities needed to best experience a disruptive event in order to limit its negative impacts. In many ways, urban resilience seems to be an appropriate response to the uncertainties associated with increased risk in urban areas. It provides a sufficiently flexible framework for action to encourage innovation in all its forms. However, this flexibility – this richness of interpretation – undermines the concrete application of the concept. Few managers, decision-makers or urban stakeholders actually use the concept to influence how

they act on the territory. This is why some researchers have examined the difficulty of operationalizing the concept.

The objective of this article is to present two approaches that aim to address the biases and limitations of the theoretical concept of resilience by working to operationalize it through decision support tools, on one hand, and collaborative approaches, on the other hand, in order to enhance the use and performance of spatial decision support systems and improve resilience conditions. These tools protect organizational resilience, in the case of a tool developed in Quebec (Canada), and holistic resilience, in the case of a tool developed in Avignon (France), in areas subject to flood risk. Through a collaborative approach to understanding local managers' needs and habits, the aim is to enrich and adapt these decision support tools and integrate resilience into local stakeholders' risk management strategies, so they can adapt better to climate change.

We will first analyze the two strategies for operationalizing resilience – organizational and holistic – tested in Canada and France, and then examine the collaborative process designed to integrate scientific and local expertise in order to promote the adoption of the concept of resilience in risk management strategies.

2 Spatial decision support systems design for organizational and holistic resilience assessment

Starting from the observation that the implementation of resilience because of the lack of clarity about how to define it, some projects have sought to define and delimit the issues in order to identify specific objectives. We propose to compare two theoretical attempts to clarify the concept of resilience: at the holistic level, in Avignon (France), and at the organizational level, in Quebec (Canada).

2.1 French spatial decision support system for holistic resilience

2.1.1 Climate and risk issues in France's Mediterranean region

In Europe, extreme events will lead to increased costs. Floods, and especially the risk of coastal flooding, should increase significantly. Consequently, the current average damages of €3 billion per year will be multiplied by a factor of at least 5 by the end of the century and in the worst case scenario will reach €38 billion (Centre Européen de Prévention du Risque d'inondation, n.d.).

In France, flood risk is the most frequent (60% of natural disasters) and damaging (60% of damages) of all risks. Approximately, 17 million people (26% of the French population) and 9 million jobs are located in flood-prone areas (Larrue et al., 2016). Currently, the International Disaster Data Base ranks France as the European country with the second greatest exposure to very serious natural events. Damages are projected to increase because of the increasing exposure of both populations and assets (Bouwer et al., 2010). The Mediterranean region is warming faster than most of the rest of the world: compared to the global average increase of 1°C since pre-industrial times, the average temperature has already increased by 1.4°C. And if, hypothetically, the objective of maintaining the average global temperature rise at +1.5°C were met, the Mediterranean area would still be an average +2.2°C warmer (Cramer et al., 2018). Furthermore, a report by the French Ministry of the Environment estimates that there is an average of 10 deaths per year in the 12 departments along the Mediterranean coast due to specific floods. The loss ratio is therefore concentrated primarily in south-eastern France, and in particular in the Gard and Vaucluse regions. In addition, based on the proportion of the population estimated to live in floodplains, the Vaucluse, with 42%, is among the most exposed French departments, as all of its municipalities are affected by flood risk. For example, in June 2010, storms hit southeast France and the heavy rain led to flash flooding. The rainfall amounts were exceptional for the time of year; 400 mm of rain fell in less than two days in Provence, an amount that had not been seen in the previous 50 years. Hundreds of homes were flooded in the department of Var, causing several deaths (Met Office, 2011).

Avignon, in Vaucluse prefecture, is faced with physical (confluence of the Rhône and Durance rivers) and human tensions (Gentric and Langumier, 2009). According to the Preliminary Flood Risk Assessment on the Avignon Flood Risk Territory (TRI):

- the permanent population in flood-prone areas is about 400,000 people, or 67% of the estimated total population of the TRI;
- about 185,000 jobs are based in flood-prone areas, or 76.2% of the total jobs identified within the TRI (Directive Inondations Bassin Rhône-Méditerranée, 2014).

In 2010, it was estimated that, in Avignon, 768 inhabitants and a maximum of 606 jobs would be affected in the case of a frequent flooding scenario and 73,820 inhabitants for a maximum of 72,198 jobs in the case of an extreme scenario (Fig.1). With large but rare floods (the most recent major one was in 2003), Avignon's risk culture, prevention strategy and resilience operationality are in doubt.

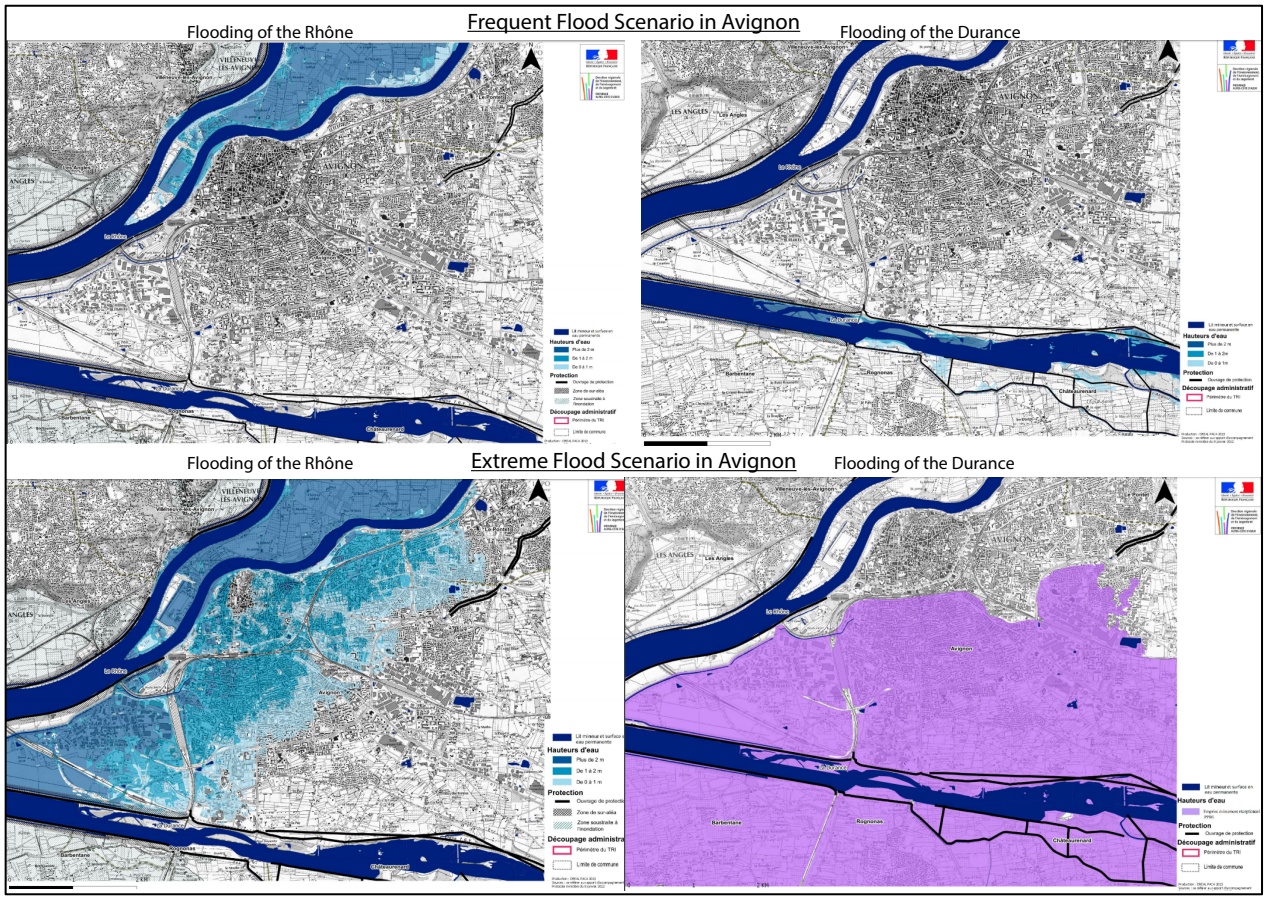

Figure 1: Frequent and Extreme Flood Scenarios, Avignon Scale, inspired by © DREAL PACA (Heinzlef et al., 2019)

Thus, there is a crucial need for a spatial decision support system to integrate the concept of resilience into practice. It should be set up in partnership with Avignon's urban and technical service departments. Although the city already has communication and protection tools, the concept of resilience is, as previously noted, hardly integrated into its systems. The main objective of this project was therefore to address the theoretical and practical biases of operationalizing resilience by co-constructing a decision support tool. Indeed, the PACA region suffers each year from events related to river overflows. Each event raises the question of territorial strategy with regard to events that are (or will be) increasingly intense and recurrent according to the forecasts of the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). However, local elected officials, managers and decision-makers are sometimes powerless on the strategies of territories to be developed both in the short and long term. At the same time, development operations are continuing in high-risk areas but without necessarily developing management strategies. Given the regional context related to flood risk and land issues, it is urgent that local decision-makers and planning professionals can therefore integrate resilience strategies

into their territorial perspectives. The tool developed in this study therefore aims to provide a basis for discussion on risk and resilience issues.

The socio-economic partnership developed with the City of Avignon and its GIS services has resulted in the exchange of data necessary for the study of the territory and daily support for the development, integration and processing of geographical data. The City's interest in this work is explained by its geographical location, at the confluence of the Rhône and the Durance rivers. Most of this territory is subject to the influence of these two rivers and has already suffered from numerous floods. The life of the community and urban developments is totally conditioned by this critical environment. Being able to offer decision support tools to integrate urban resilience has several advantages such as providing specific knowledge about the territory and participating in the preparation and anticipation of the city of tomorrow.

2.1.2A holistic approach to resilience

In this approach, the idea is that urban resilience embodies the ability of a city and its population to put measures in place before, during and after a disruptive event in order to limit its negative impacts. This scientific approach makes it possible to analyze urban resilience as a continuum, highlighting proactive capacities that the urban system must develop in order to (re)act in response to the disaster, and thereby developing learning and anticipation skills. This analysis also considers that resilience is intrinsic to the urban and human environment, and that a shock is therefore not necessarily negative or even necessary to develop resilience capacities, which may be pre-existing skills. Resilience factors can then be identified over a long period of time, in order to study and develop the potential for resilience.

A decision support tool for integrating this notion into urban practices would be extremely innovative and useful for a flood-prone community. This collaborative project enriches theoretical research work by integrating it into the social, urban, architectural, political and economic needs of the community. It is therefore positioned on the border between the practical – professional application – and theoretical research. Researchers and practitioners will increase their understanding of urban risk in all "*its dimensions of vulnerability, capacity, exposure of persons and assets, hazard characteristics and the environmen*t" (UN General Assembly, 2015), as well as resilience capacities. In the last decade, methods based on indicators have been used in the field of risk, specifically to measure the vulnerability of territories and populations at risk (Cutter et al., 2008*)*. A vulnerability indicator can be defined as a tool able to provide data about a system's susceptibility, fragility, vulnerability, adaptability and resilience (Birkmann, 2006). To give concrete form to the notion of resilience on the territory, three indicators – urban, technical and social resilience (Fig.2) – have therefore been cocreated thanks to this study conducted with the Avignon GIS department to measure pre-existing resilience (Serre and Heinzlef, 2018).

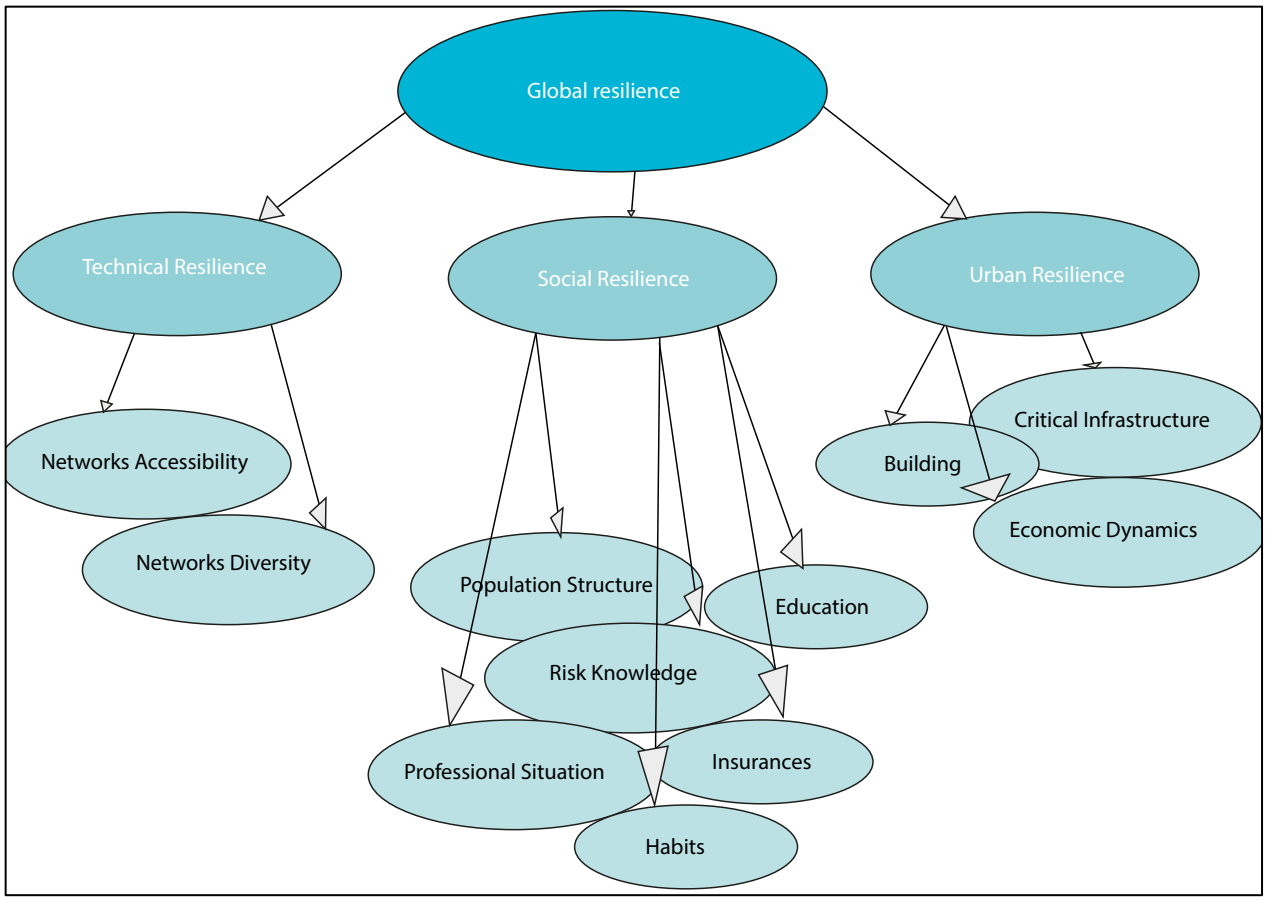

Figure 2: Resilience index built around three resilience indicators, social, technical and urban. Each indicator is divided into sub-variables to analyze the potential resilience of the territory.

We used variables to study both inherent vulnerability and inherent resilience of a society and its territory (Serre and Heinzlef, 2018). These variables indicate a *potential* for resilience in order to revive a social, economic, urban, or systemic activity after a disruption (Heinzlef and al., 2019). The variables for each indicator were based on an analysis of the scientific literature in order to identify the different social (age of the population, level of education, knowledge of risk, etc.), urban (urban structure, economic dynamics, state of structures, etc.) and technical components of the territory. The scientific consensus that resilience is multidisciplinary led to the selection of data on social, economic, institutional, infrastructure and community factors (Cutter et al., 2008).

Then, each variable was placed on a positive or negative resilience curve. This definition of the parameters corresponds to a unique form of deviation (Holand et al., 2011) for each variable, thus making it possible to vary the overall value of the resilience per indicator. In order to create a generic tool that can be used by different players, all the indicators were built using open-source national data (e.g., the Sirene database maintained by INSEE, France's National Institute of Statistics and Economic studies). The resiliency calculation for each variable and indicator was built using a Data Management Engine (ETL), the Feature Manipulation Engine, used by French cities' GIS departments. Maps and analyses were created on the QGIS platform. The spatial scale of analysis was local, given the desire to work with local stakeholders in order to respond to their management problems in dealing with the risk of flooding. Thus, urban projects at the neighborhood level were analyzed in terms of their contribution to the intrinsic resilience of a larger area. Projects at this neighborhood or urban scale, which has not been much explored, allow one to act directly on the territory, innovate, experiment and test new practices directly with managers. As a result, the main scale of study chosen to assess urban resilience must be as accurate as possible, namely at the IRIS scale (Regrouped Ilots for

Statistical Information). This scale is located between the 200 x 200 m grid (INSEE) and the District Council level. Each computation is therefore multiscalar but also multitemporal. Indeed, resilience to risks must be conceived of according to a multitemporal paradigm: stakeholders need to act before the crisis, or anticipate (urban planning), and to recover from the event afterward (rebuild, restore an activity, adapt) (Barroca et al., 2013).

Preliminary results, based on the social and urban resilience indicator, make it possible to analyze Avignon's social structure according to the capacity of the various populations and urban structures to support and recover from an event. Because each indicator (urban, technical and social) is independent of the others, politicians and managers find it easier to work on variables with low levels of resilience and identify areas to be redeveloped and/or reintegrated in urban dynamism.

2.2 Canadian spatial decision support system for organizational resilience

2.2.1 Climate and risk issues in the province of Quebec

In the past few decades, Quebec's climate has changed significantly. Average daily temperatures in southern Quebec have increased by from 0.2°C to 0.4°C per decade (Québec (Province) and Ministère du développement durable, 2013). In winter, by 2050, average temperatures are predicted to increase by 2.5°C to 3.8°C in southern Quebec and 4.5°C to 6.5°C in the north. In summer, average temperatures are expected to increase between 1.9°C and 3.0°C in the south and between 1.6°C and 2.8°C in the north.

It is accepted that the impacts of temperature changes under the 1.5°C, 2°C and 4°C global warming scenarios will lead to more frequent flood events. In fact, floods are projected to increase on all continents under all considered warming levels, leading to a widespread rise in the flood hazard (IPCC, 2018). Climate change will result in more frequent and more intense extreme weather events (winter storms, high winds, heavy rains, etc.). These events may well lead to various natural hazards such as floods, erosion, earthquakes, etc. Expected increases in the duration, frequency and intensity of rainfall will have a significant impact on the frequency of sewer overflows and their indirect effects (backflows, overflows in the natural environment, flooding of urban areas) and on erosion caused by water runoff. These phenomena also pose a risk to municipal urban drainage infrastructure and drinking water intakes. The Quebec floods in 2017 were a harsh reminder of the reality of this risk (Commission de l'Aménagement, 2017; Ministère de la Sécurité publique Québec, 2017). From late February to June 2, 2017, floods occurred in 15 administrative regions, affecting an unprecedented total of 291 municipalities. These proven and expected climate changes have prompted managers and scientists to address the challenges of operationalizing resilience (Borie et al., 2019).

2.2.2 An organizational resilience approach

Crises are becoming increasingly complex, largely due to the many interdependencies between critical systems and their infrastructures in urban societies. A mode of operation that promotes interorganizational collaboration is much more effective than a "silo" model, especially when key relationships are established before the crisis itself. But few known partnerships have made it possible to develop operational mechanisms for preventive mobilization related to intersectoral interdependencies and the prevention of domino effects (Robert and Morabito, 2009). Identifying resilience as an objective to achieve is beneficial, but the manager of an organization still has to implement this objective on a daily basis. The first task is to assess the organization's resilience potential based on the flexibility the manager has to make internal decisions. Various approaches exist to characterize and assess this resilience, but they fail to capture the full specificity of an organization (resilience engineering, ecosystem resilience, community resilience). In an organizational context, the objectives are always essentially the same:

- ensure acceptable operation;
- adapt to different changes in the environment, both internal and external;
- restore operations in the event of an interruption.

The operationalization of these objectives requires the integration of emergency measures and business continuity plans by both private and public organizations. It is then possible to assess an

organization's ability to manage disruptions and thus measure its potential for resilience. In Quebec, the *Centre Risque & Performance* (CRP) at *Polytechnique Montréal*, in conjunction with the Ministère de la Sécurité publique, has defined resilience as "*the ability of a system to maintain or restore an acceptable level of operation despite disruptions or failures*" (Robert et al., 2008). In partnership with more than 15 ministries and key networks, indicators have been developed to assess an organization's potential for resilience, paving the way for diagnoses and recommendations for action to strengthen this potential. The concept of resilience is perceived as being rather theoretical and complex. Given that the assessment of resilience must become an important decision-making tool for organizations, it is therefore crucial to integrate it into their culture, even though the transition from theory to practice is difficult. The first way to act concretely in an organization to operationalize all these concepts and make it more resilient is to integrate the notion "Accept – Anticipate – Plan" (Robert et al., 2017). The cement that binds these concepts and builds the system's resilience is the continuous evaluation of the coherence between all elements of knowledge, anticipation mechanisms and planning rules within the system, as well as its coherence with its environment.

The capacity of CIs to function despite disruptions is the core of community resilience. Modern societies depend more and more on essential resources (telecommunications, energy, drinking water, etc.); organizational management is increasingly based on lean and just-in-time principles; and the service sector (financial transactions, postal services, information networks, social media, etc.) relies increasingly on immediate access to remote information. In parallel with this growth in needs, CIs are subject to new risks associated with major changes in their environment (climate change, technological change, social change, etc.), which require them to be very adaptable. In addition to society's dependency on the resources provided by CIs, we must consider the complexity of these infrastructures' functioning and the many interdependencies between them. The result is that all the conditions are in place to ensure that any disaster may assume unsuspected proportions, with consequences that directly affect communities' health, safety and socioeconomic activities.

Thus, when a disaster occurs, community resilience depends greatly on the resilience of these organizations, that is to say, their ability to maintain a certain acceptable level of service and, especially, to restore it as quickly as possible. Knowledge of the issues facing each stakeholder is key to ensuring resilience. Such knowledge makes it possible to understand the various issues based on different possible levels of acceptance and anticipation of the consequences, but also on the variability of the numerous planning and crisis management tools. To meet this knowledge sharing challenge, it is necessary to implement a collaborative mechanism (Robert et al., 2008). The guidance of this collaborative mechanism is rooted in a consequence-based risk management approach. Unlike traditional risk management approaches (which start with a triggering event), this approach focuses on the consequences associated with the failure of an infrastructure, and not with the causes of that failure. This makes it possible to conduct all the necessary analyses of the dependencies among CIs. The results are shared in the form of dependency curves (Fig.3) that use a color code to indicate the various organizations' dependency on the resources they use (changes in the state of the system based on the duration of outages). These curves provide results that are more concrete, realistic and reliable and that better meet organizations' real needs; consequently, organizations are more likely to accept them and take ownership of the results faster (Robert et al., 2015). The knowledge related to these curves enables CI managers to determine acceptability thresholds for certain durations of possible failures, anticipate the consequences for other CIs, and integrate these parameters into their measurement tools (emergency measures, business continuity and asset protection plans). Although the resilience parameters of these independent organizations exist, the concept of capacity means that the coherence of these parameters throughout a community's territory must be assessed dynamically.

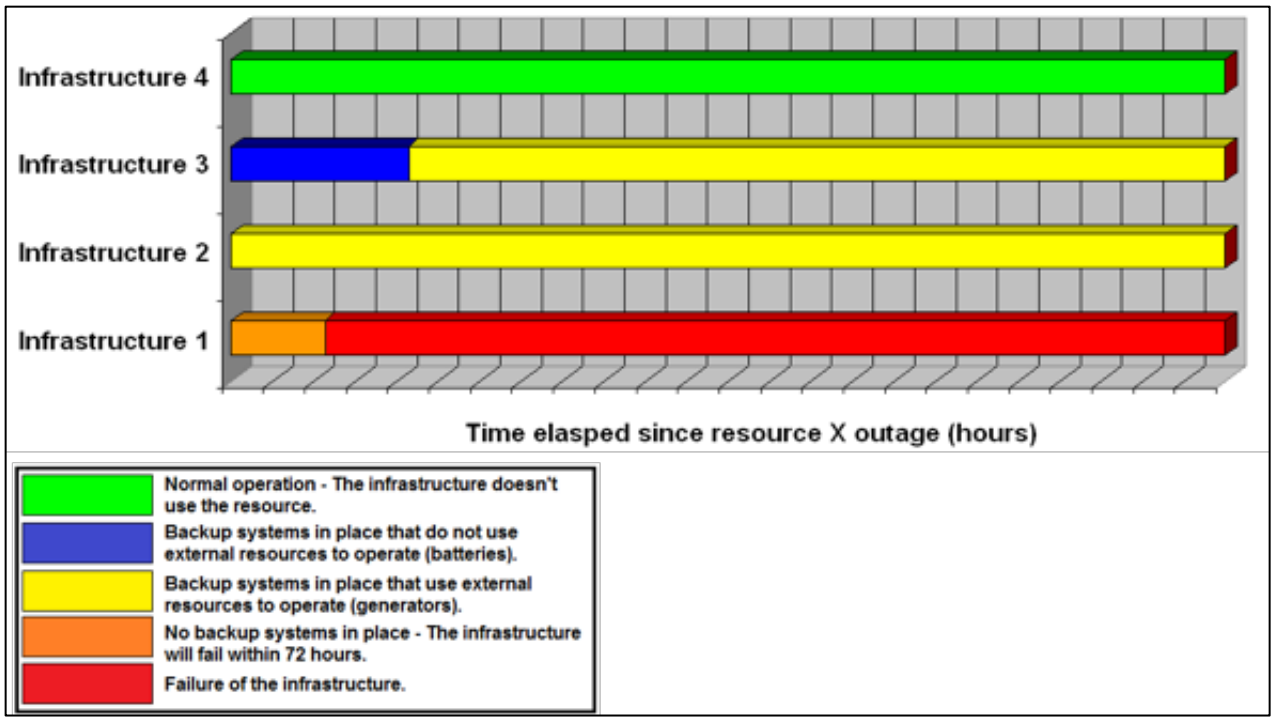

Figure 3: Example of dependency curve.

2.3 Comparative analysis of the holistic and organizational resilience approaches

This work on defining the issues and characteristics of resilience has made it possible to develop two approaches intended to clarify a concept that is still very abstract for urban managers. Both the organizational approach focused on the vulnerability of CIs in a context of climate change and the holistic approach based on urban, technical and social resilience tested in Avignon have made it possible to reconsider the practical integration of resilience into risk management strategies. Because they clarify the concept and define its challenges and characteristics, these tools are essential to the work of appropriating and building resilience strategies. While they are the first step toward these resilience strategies, there is a limit to their use by local managers and elected officials.

The tool developed with the organizational approach allows CI managers to understand the evolution of a situation likely to generate domino effects. Its primary role is therefore to identify CIs and areas potentially impacted by these domino effects. The information provided by this tool allows organizations to make better and faster decisions. This makes it possible to increase the capacity for collective response by promoting coherence among all the stakeholders' actions. Although essential and innovative in its modeling and information approach, this tool examines only the resilience of CIs, which greatly limits the analysis of the resilience of the urban territory and its population. In addition, certain technical limitations make this tool more difficult for managers to use and adapt. Several technical challenges remain to be addressed, including the automation of certain tasks and the interface and the integration of new options for considering natural hazards and industrial risks. Other challenges are organizational. For example, it will be necessary to determine who should have access to this system and who will be responsible for managing and updating it. It is also necessary to define interorganizational communication mechanisms and adopt a structure that allows 24/7 access to the system. The system should be hosted by a monitoring organization with an existing foundation such as a government monitoring center. On the other hand, the partner networks require the system manager to be neutral so that the tool and the data that feed it are not used for any purpose other than emergency management.

The holistic approach attempts to address the challenges of a systemic approach to resilience by

assessing it from an urban, technical and social perspective. The collaboration with the GIS departments of the city of Avignon attempted to address the limitations affecting appropriation and operationalization of urban resilience in risk management strategies. Although this collaboration has provided some interesting results, and more are anticipated, the question of the autonomy of urban planners and managers may ultimately arise at the end of the project. How and to what extent will this tool be used in risk management practices once the study itself is completed?

This is why, on the basis of these interesting and innovative tools, we propose an approach built *a posteriori* to understand managers' habits and functioning, in order to better understand their needs. This collaborative, participatory approach aims to enrich both approaches and adapt them to the needs of managers, so that resilience strategies for risk management can be developed.

3 Improving Canadian and French spatial decision support systems with collaborative workshops

In order to diversify the approaches and, above all, to take stock of the results of the implementation of resilience in practice, we decided to organize participatory workshops to understand and test the appropriation of these two different tools and approaches by urban planners, CI managers and risk managers, with a view to adapting our scientific approaches and improving the construction of these tools so they become easier to integrate into resilience strategies and policies.

3.1 Objectives

As part of a scientific analysis and a joint exercise between two regions – the province of Quebec (Canada) and the city of Avignon (France) – we decided to analyze flood risk management systems. These strategies, designed by the various actors and managers of a community, are intended to contribute to a territory's resilience.

We have therefore sought to understand how these strategies are constructed and, above all, shared by the various stakeholders in the territory. The objective was to analyze the different actions envisaged by the participants in each organization according to the various plans at their disposal and then to analyze the coherence of these planned and unplanned actions.

Indeed, collaboration mainly involves the various stakeholders buying in to common goals. Collaboration therefore goes beyond the simple exchange of knowledge and information but allows stakeholders to "create a shared vision and articulated strategies to bring out common interests that go beyond the boundaries of each particular project" (Chrislip, 2002). However, it would be beneficial to build this shared vision and commitment around the concept of resilience, an approach that would also allow a transition in how cities are designed, and risks understood in urban environments. We therefore propose to develop strategies to integrate resilience so that they can be co-constructed with municipal stakeholders, both so that they invest directly in the process and so that they apply this strategy before and during a crisis (Serre et al., 2013).

3.2 Comparative approaches in the city of Avignon and in two Quebec RCMs

3.2.1Avignon, France

The first workshop was held in Avignon (Vaucluse, France), the territory on which a decision support tool is being built to integrate "holistic" resilience into flood risk management approaches. The objectives of the workshop were very clear. The research team wanted to identify and address several issues such as the appropriation of the concept by managers and the operationalization of the concept in order to make it sufficiently interesting and useful for users. To meet these objectives, it was necessary to define expectations, objectives and issues and to identify the various stakeholders' capacities for individual and joint action and consider their long-term risk management strategies (Tab.1).

Type of actors/ Services	Names
Urban Managers	VEOLIA (Water management) GRDF (Gas network) ENEDIS (Electricity network)
City of Avignon (Avignon Scale)	Art and Hydraulic Dams Dyke Management Traffic lights GIS service
Agglomeration scale	Management of Aquatic Environments
Academics	University of Avignon Montreal Polytechnic

Table 1: Avignon's workshop stakeholders

In particular, we sought to analyze flood risk management systems. These strategies, designed by the various actors and managers in a community, are supposed to contribute to its resilience. It was therefore necessary to understand how these strategies are constructed and shared by stakeholders and to analyze their coherence.

To prepare for this technical workshop, we created a preparatory questionnaire to initiate an initial reflection process on flood risk management by CI managers and municipalities. The purpose of this form was to stimulate discussion between the various actors on the following points:

1. The issues at stake in the Avignon area;
2. The CIs concerned;
3. The vulnerability of CIs.

During the discussions among stakeholders, several topics that were associated with tension and limits were highlighted. Firstly, the "long-term" horizon, set at 2030 by the urban managers and city officials, is already obsolete. At a minimum, management plans should posit a 2050 horizon. Then, communication between the different decision-making levels is very difficult: for example, the prefecture has a list of CIs, but the municipal government is not aware of them. Another limit is the valve-based flood protection system, which is almost entirely dependent on the power grid; only two valves are manual. In the event of a power failure due to flooding, the valves cannot be operated. The system of manual cofferdams and gates depends on the number of people on duty when a flood strikes (accessibility of flooded areas, availability of workers, etc.). The natural gas distribution system is dependent on human assistance when it is recommissioned. Indeed, the need to deal with each customer individually lengthens the restoration of the electricity system, slowing down other services. The electricity system does not seem to have planned any preventive actions to avoid the impact of a flood on the network (no early shutdown is envisaged). The water and waste management company's systems do not seem to consider the amount of human and other waste produced by a flood and has no management system. This waste, in addition to blocking streets and thus limiting accessibility to certain areas, can cause disease. Finally, the hospital is a source of tension. It is accessible only by a single dead-end road. How is such a building to be evacuated or kept running? In addition, the hospital, located right in a flood-prone area, only has emergency generators if the power system should become unusable. Therefore, the question arises as to these plan B systems' capacity for use (are operations possible?) and duration (a few days, a week?).

Despite these limitations, which stakeholders mentioned in their speeches, while the academics in charge of building a decision-making tool to integrate resilience into urban practices were present, urban planners and decision-makers remained essentially focused on their achievements related to the experience or legacy of risk management in the Avignon area rather than moving forward toward collaboration between academics and territorial players. There is a clear lack of communication, cohesion and collaboration, which is all the more striking

as the University of Avignon and the city are partners in numerous research projects to overcome the lack of tools and plans and the increased uncertainties related to flood risk in a context of climate change and urban population growth.

Thus, despite the joint research projects and the creation of a decision support tool to inform managers about holistic resilience, the workshop further demonstrated the limits of such collaborations and especially the current lack of autonomous appropriation of the resilience tool, or even the concept.

3.2.2Quebec, Canada

Two exercises were carried out in Quebec concerning a more general problem related to water, namely risks to the drinking water supply. This problem is interesting at many levels. In the short term, it makes it possible to investigate the level of preparedness and emergency measures. In the long term, combined with climate change, it shows the importance of implementing measures to protect this resource (Janke et al., 2014). The long-term view also highlights the importance of considering future uses in relation to current decisions.

The exercises were done in the course of a research project on the vulnerability and resilience of regional territories' CIs in a context of climate change. The project is being executed in two regional county municipalities (RCMs, or groups of municipalities) in the province of Quebec. Case studies were done in each RCM. The goal is to better understand the challenges related to communities' resilience in connection with their dependency on the various CIs that exist on their territory.

These case studies made it possible bring together close to 30 participants, from numerous essentially public organizations (Tab.2) in each RCM. To orient these case studies, all participants were asked to do some preliminary work to identify the first management measures they would apply in case of a shortage of drinking water. Ideally, these measures should be supported by emergency measures, business continuity and asset protection plans. In a plenary session, these actions were presented and discussed in order to identify possible disparities among these decisions but also, and most importantly, to identify the relevant organizational interdependencies. An assessment was done of the possible integration of concepts related to climate change in decision-making.

Type of actors/ Services	Name
Urban Managers	General manager Fire department Public work department Water management Wastewater management Infrastructure management General administration
RCM	General manager's GIS expert
Government	Ministère de la Sécurité publique du Québec Ministère de l'Environnement et Lutte contre les changements climatiques Ministère des Affaires municipales et Habitation
Academics	Montreal Polytechnic The University of Public Administration
Experts	OURANOS consortium

Table 2: Quebec's workshop stakeholders

In terms of results, there was no disparity in the analyses carried out in the two RCMs, despite the differences in the occupation of the territory and socioeconomic issues. Several findings emerged regarding the analysis of the resilience of the communities on these territories in the face of CIs. The concept of knowledge immediately became salient. Many stakeholders did not have adequate knowledge of the concept of CI, even when their own organization was considered to be one. All decisions were made in a single-organization context, without considering possible dependencies on other CIs. The corollary is that crisis management planning tools do not take account of these dependencies, given that they are not widely known. Finally, most planning tools are centered on management based on the security of the population over a period of several days, but there is practically no consideration of the socioeconomic consequences for the territory over a longer period.

4 How do collaborative workshops improve risk management perspectives in France and Canada?

4.1 Advantages and disadvantages of collaborative workshops

The results of the workshops are mixed. A significant lack of coordination and cohesion between stakeholders was highlighted. Both for tools meant to integrate organizational resilience into the various stakeholders' operations in the territory and for tools codesigned with the players in the territory to increase holistic resilience, the gap between the scientific approach and managers' appropriation of the concept is still a large one.

Some advice and suggestions can already be made to improve cohesion between players facing a common risk. In the case of Avignon, risk management measures should be put in place that consider specific time frames. For instance, it is necessary to measure the duration of CI autonomy. For instance, can the hospital generators' autonomy be measured in hours, days or weeks? Particular attention should be paid to how to initiate joint discussions of business continuity plans. What if electricity is not available for more than a week? Which spatial areas will be impacted? And what part of the population will be most vulnerable? The most important weakness that will have consequences in the short, medium and long term remains the lack of coordination, cohesion and communication among the various stakeholders, departments and managers. Efforts must therefore focus first and foremost on this point. With this in mind, the academic team that worked on the Avignon decision support tool to increase resilience took several actions to contribute to improving this weakness. In order to achieve a global, coconstructed vision, the academic team sought to feed this collaboration – first of all by bringing together local players and students to discuss the flood risk and planning. This kind of association allows students to be involved in projects on the territory where they live and gives them a chance to put their theoretical learning into perspective based on the realities on the ground. The idea is to make this collaboration a long-term one in order to allow different points of view to come into contact, to track changes in the territory and its policies, as well as the theoretical advances that the students represent. In addition, following the discussions at the workshop, certain city departments (mobility, waterworks, etc.) specifically asked to work together with local stakeholders and researchers on the challenges of increased flooding, development and resilience. This extremely positive result shows the growing need for territories to acquire strategies and tools to operationalize urban resilience, but also demonstrates the feasibility and usefulness of this type of approach.

Regarding follow-up after the workshop held in Quebec, ongoing work has been arranged. Individual and/or subgroup meetings are planned in the coming months to clearly identify the issues and create a portrait of the situation. The number and diversity of the actors involved also explain the need to work in subgroups in order to develop trusting discourse and address the issues subject to debate in more depth; this is impossible if stakeholders cannot or do not feel free to express themselves, particularly because of tensions between organizations.

The French study is being continued by means of weekly meetings with the city service departments in order to work jointly on a short- and long-term strategy to integrate resilience into communal services and vulnerable populations (particularly by means of interventions with

schools in flood zones). The concrete outcome of this collaboration process will be the construction of an official operational document, as well as some scientific work (participation in joint presentations). The aim is to develop a "toolbox" that managers can use to work through the various time frames of flood risk, in order to be proactive in dealing with growing uncertainty. This toolbox includes the mapping tool but expands the approach with a more general reflection process intended to determine the premises for a resilience observatory, for which the test territory would be Avignon; this observatory would be the outcome of a scientific analysis and managers' practice and experience on the territory.

The findings of the two Canadian workshops echo those of a previous workshop held on the city of Montreal. Planning (emergency measures, business continuity, asset protection) exists but it is not uniform. The levels of acceptance of the consequences and failures are not uniform either. The anticipation thresholds of failures and alert levels are highly variable. On the other hand, the stakeholders agreed that knowledge of CIs and organizations' dependency on those CIs is the core of resilience. To improve the capacity to manage disruptions, it is important to be familiar with the territory and the CIs that exist on it. This knowledge can then be integrated into numerous planning tools and exercises.

To reach this conclusion, it is important to properly characterize the territory in terms of CIs. More operational exercises regarding the real-life capacity to manage disruptions must be done. The act of working on a case of a shortage of drinking water – a situation that changes over time and quickly affects the population, as well as industrial activity – highlighted the need to link CI failures to their economic consequences.

From the point of view of following up on these workshops and developing a strategy in accordance with managers' needs, the Canadian research work continued with the definition and mapping of CIs on the test territories, with the managers' agreement. To identify and characterize CIs on the RCMs' territories, the concept of key elements was used. An element deemed to be key is one on which a CI manager's or owner's management, operating, exploitation and control activities depends. If this element becomes unavailable, the operation or management of the CI will be disrupted or interrupted. For each CI for which the key elements have been identified on the territory, all the stakeholders must establish an overall level of consequences on the territory in the event of a service interruption. The assessment of these consequences must incorporate a temporal parameter that assigns an order of magnitude to their appearance.

For this reason, each key element that is mapped is linked to a CI for which the consequences on the territory were evaluated by consensus. This knowledge, which is the heart of resilience, will directly enable the many organizations involved to enhance their ability to manage disruptions related to CIs. This knowledge must be integrated into:

- The creation of climate risk maps;
- The management of short- and medium-term climate risks;
- The management and development of the territory;
- The updating of municipal and regional emergency measures plans;
- The updating of business continuity plans;
- Etc.

Although the results of the first workshops have revealed the gap between scientific progress and its appropriation by managers, the continuation of these discussions, particularly by backtracking to engage in primarily informative work (definition, location and mapping) on CIs, has made it possible to keep the discussions active, ask further questions about the status of territorial knowledge related to risk, and advance together to creating a knowledge base and a tool based on managers' and urban decision-makers' practices.

4.2 Potential for spatial decision support systems use and appropriation

The creation of and reflection on these tools highlighted the challenges of operationalizing resilience. Although these tools have advanced the understanding, definition and appropriation of the concept of resilience, its operationalization by urban managers so far has been limited, to say the least. This limitation was explained in particular by the lack of support and autonomy in the use of these tools, which received very limited practical use by managers. The workshops highlighted the advances but also the technical and theoretical limitations of these tools.

This reflection and collaboration process has made it possible to restart the debate on the concept of resilience, its definition, and the criteria for integration into risk strategies. Integrating the points of view, experiences and subtle reflections of the different actors involved in risk management (both managers and citizens) leads to a profound questioning of these tools and their adoption by local stakeholders.

Therefore, a paradigm shift must take place in order to integrate stakeholders. Although this transition may seem insurmountable to some people and unproductive to others, it has nevertheless been proven that the construction of a base of knowledge common to experts and lay people makes it possible to reduce complexity, take each party's interests into account, and encourage the acceptance and appropriation of solutions (Toubin, 2014). Thus, despite the necessary efforts to build this trust, collaboration and common dialogue, the result is better integration and acceptance of the work of the experts. In addition, since these subjects, such as environmental issues, urban risks and climate change, affect and involve all stakeholders, integrating them not only makes it possible to address new points of view and approaches but also to build knowledge equity. Thus, the integration of the various players has a doubly positive impact: it makes it possible to meet the objectives of an urban project by improving the proposals but is also an objective in itself by respecting the wishes underlying the consultation process.

Managers need to be flexible so they can adapt and negotiate so they can convince (Joerin, 1997). In that way, right from the outset of a project, they can formalize a vision and ensure knowledge coconstruction among the different actors. As a result, the outcome will be more legitimate and relevant. Thus, through dialogue, compromise and individual awareness, environmental strategies and adaptation strategies in response to risks will have a greater chance of having a real positive impact on a territory and its population.

Briefly, the operationalization of resilience necessarily requires the involvement of multiple actors in order to propose coherent urban planning and adaptation strategies that will best respond to the threat of increasing risks in urban areas.

5 Conclusion

In a context of climate change, with the increasing frequency and intensity of natural disasters, resilience emerged in the 2000s as an innovative concept in risk management. As an innovative concept – at the political, urban, architectural and social levels – resilience has struggled to respond to the challenges of growing climate uncertainties and to urban planners' questions. While strategies now exist to attempt to address the biases of this concept by working on its operationalization – notably through the creation of simulation (Robert et al., 2017) and measurement tools (Serre and Heinzlef, 2018) – the appropriation of the concept of resilience and its translation into risk management strategies are still very limited. This is why, after working on tools to define and operationalize the concept, we focused on the need to work through collaborative approaches with urban managers and decision-makers to address climate change issues, climate and urban uncertainties, and resilience strategies.

This paper emphasizes the difficulty of operationalizing resilience. It presents two approaches that are intended to be innovative, both in their theoretical underpinnings (organizational approach and holistic approach) and in their implementation (collaboration with local actors). Nevertheless, the results of workshops to determine whether flood risk management strategies and systems integrate resilience are extremely mixed. Although the concept itself is known and mentioned in official and individual speeches, its operationalization and integration into objectives, actions, strategies in the short, medium and long term, has barely begun.

Nevertheless, setting up these workshops enabled us to make tangible progress toward improving resilience tools. While they are generally known in scientific circles, their appropriation by planners is not yet fully effective. Although the results in themselves are mixed, they have made it possible to build a common approach over the long term.

These workshops allowed academic conceptions and practical realities to come face to face in dealing with the issue of resilience and climate change. Awareness of the limits that still persist today will allow communities to deepen their understanding of the challenges involved in integrating the concept of resilience into their urban

practices. In that way, they may be able to face climate uncertainties and also to address some of the issues observed during these exchanges. As a result, these decision support tools may become as relevant as possible in dealing with practical realities and the concerns and practices of stakeholders. Ultimately, they may help to build a bridge between scientific advances and the real-world experiences of urban planners.

References

Adger, W.N., Brooks, N., 2003. Does global environmental change cause vulnerability to disaster?, in: Pelling, M. (Ed.) Natural Disasters and Development in a Globalizing World. Routledge, London, pp. 19–42.

Barroca, B., DiNardo, M., Mboumoua, I., 2013. De la vulnérabilité à la résilience: mutation ou bouleversement? EchoGéo 24. https://doi.org/10.4000/echogeo.13439

Birkmann, J., 2006. Indicators and criteria for measuring vulnerability: theoretical bases and requirements, in: Birkmann, J. (Ed.) Measuring Vulnerability to Natural Hazards: Towards Disaster Resilient Societies. UNU-Press, Tokyo.

Boin, A., Comfort, L., Demchak, C.C., 2010. The rise of resilience, in: Comfort, L., Boin, A., Demchak, C.C. (Eds.) Designing Resilience: Preparing for Extreme Events. Pittsburgh University Press, Pittsburgh, PA, pp. 1–12.

Borie, M., Pelling, M., Ziervogel, G., Hyams, K., 2019. Mapping narratives of urban resilience in the global south. Glob. Environ. Change 54, 203–213. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.01.001

Bouwer, L.M., Bubeck, P., Aerts, J.C.J.H., 2010. Changes in future flood risk due to climate and development in a Dutch polder area. Glob. Environ. Change 20, 463–471. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.04.002

Brand, F.S., Jax, K., 2007. Focusing the meaning(s) of resilience: resilience as a descriptive concept and a boundary object. Ecol. Soc. 12, 23.

Centre Européen de Prévention du Risque d'inondation, n.d. Heading towards an increased flood risk in France and Europe? https://www.cepri.net/tl_files/pdf/reglementation_digues/Plaq%20sensibilisation%20GB.pdf

Chrislip, D.D., 2002. The Collaborative Leadership Fieldbook: A Guide for Citizens and Civic Leaders. Jossey-Bass, San Francisco.

Comfort, L.K., Boin, A., Demchak, C.C. (Eds.), 2010. Designing Resilience: Preparing for Extreme Events. University of Pittsburgh Press, Pittsburgh, PA.

Commission de l'Aménagement, 2017. Portrait des inondations printanières de 2017 sur le territoire métropolitain, du cadre légal et des règles applicables en matière d'aménagement de développement du territoire pour les plaines inondables. Communauté métropolitaine de Montréal, Montreal. http://cmm.qc.ca/fileadmin/user_upload/documents/20170915_Inondations2017_rapportCAM.pdf

Cramer, W., Guiot, J., Fader, M., Garrabou, J., Gattuso, J.-P., Iglesias, A., Lange, M.A., Lionello, P., Llasat, M.C., Paz, S., Peñuelas, J., Snoussi, M., Toreti, A., Tsimplis, M.N., Xoplaki, E., 2018. Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. Nat. Clim. Change 8, 972–980. https://doi.org/10.1038/s41558-018-0299-2

Cutter, S.L., Barnes, L., Berry, M., Burton, C., Evans, E., Tate, E., Webb, J., 2008. A place-based model for understanding community resilience to natural disasters. Glob. Environ. Change 18, 598–606. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.07.013

Cyrulnik, B., 2004. La résilience ou comment renaître de sa souffrance? Fabert, Paris.

De Bruijne, M., Boin, A., Van Eeten, M., 2010. Resilience, exploring the concept and its meanings, in: Comfort, L., Boin, A., Demchak, C.C. (Eds.) Designing Resilience: Preparing for Extreme Events. University of Pittsburgh Press, Pittsburgh, PA, pp. 13–32.

Directive Inondations Bassin Rhône-Méditerranée, 2014. Territoire à Risque Important d'Inondation (TRI) d'Avignon – Plaine du Tricastin – Basse Vallée de la Durance. http://observatoire-regional-risques-paca.fr/sites/default/files/information/TRI_Avignon_Fiche.pdf

European Environment Agency, 2017. Climate change adaptation and disaster risk reduction in Europe: enhancing coherence of the knowledge base, policies and practices. https://www.eea.europa.eu/publications/climate-change-adaptation-and-disaster

Field, C.B., Intergovernmental Panel on Climate Change (Eds.), 2012. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, New York.

Fuchs, S., Thaler, T. (Eds.), 2018. Vulnerability and Resilience to Natural Hazards. Cambridge University Press, New York.

Gentric, J., Langumier, J., 2009. Inondations des villes, inondations des champs: Norme et territoire dans la prévention des inondations sur l'île de la Barthelasse (Avignon). Nat. Sci. Sociétés 17, 257–265. https://doi.org/10.1051/nss/2009040

Heinzlef, C., Becue, V., Serre, D., 2019. Operationalizing urban resilience to floods in embanked territories – Application in Avignon, Provence Alpes Côte d'azur region. Saf. Sci. 118, 181–193. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.05.003

Holand, I.S., Lujala, P., Rød, J.K., 2011. Social vulnerability assessment for Norway: A quantitative approach. Nor. Geogr. Tidsskr. – Nor. J. Geogr. 65, 1–17. https://doi.org/10.1080/00291951.2010.550167

Holling, C.S., 1973. Resilience and stability of ecological systems. Annu. Rev. Ecol. Syst. 4, 1–23.

IPCC, 2018. Global Warming of 1.5°C. Geneva, IPCC.

Janke R., Tryby M.E., Clark R.M., (2014) Protecting water supply critical infrastructure: an overview. In: Clark R., Hakim S. (Eds.) Securing Water and Wastewater Systems. Protecting Critical Infrastructure, vol. 2. Springer, Cham, Switzerland.

Joerin, F., 1997. Décider sur le territoire – Proposition d'une approche par utilisation de SIG et de méthodes d'analyse multicritère. Thesis, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne.

Koffi, J.-M., 2014. La résilience: origines et évolutions d'un concept polysémique, in: Châtaigner, J.-M. (Ed.) Fragilités et Résilience. Éditions Karthala, Paris, pp. 53–62.

Larrue, C., Bruzzone, S., Lévy, L., Gralepois, M., Schellenberger, T., Trémorin, J.B., Fournier, M., Manson, C., Thuillier, T., 2016. Analysing and evaluating flood risk governance in France: from state policy to local strategies. https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01981420/document

Linkov, I., Bridges, T., Creutzig, F., Decker, J., Fox-Lent, C., Kröger, W., Lambert, J.H., Levermann, A., Montreuil, B., Nathwani, J., Nyer, R., Renn, O., Scharte, B., Scheffler, A., Schreurs, M., Thiel-Clemen, T., 2014. Changing the resilience paradigm. Nat. Clim. Change 4, 407–409.

Meerow, S., Newell, J.P., Stults, M., 2016. Defining urban resilience: A review. Landsc. Urban Plan. 147, 38–49. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.11.011

Met Office, 2011. Climate: Observations, projections and impacts. https://www.metoffice.gov.uk/climate-guide/science/uk/obs-projections-impacts

Ministère de la Sécurité publique Québec, 2017. Rétrospective – Inondations du printemps 2017. https://www.securitepublique.gouv.qc.ca/fileadmin/Documents/securite_civile/inondation/retrospective_bilan_inondations2017.pdf

Nones, M., Pescaroli, G., 2016. Implications of cascading effects for the EU Floods Directive. Int. J. River Basin Manag. 14, 195–204. https://doi.org/10.1080/15715124.2016.1149074

Pescaroli, G., Kelman, I., 2017. How critical infrastructure

orients international relief in cascading disasters. J. Contingencies Crisis Manag. 25, 56–67. https://doi.org/10.1111/1468-5973.12118

Pescaroli, G., Nones, M., 2016. Cascading events, technology and the floods directive: future challenges. E3S Web Conf. 7, 7003. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160707003

Québec (Province), Ministère du développement durable, environnement et parcs, 2013. Le Québec en action vert 2020: stratégie gouvernementale d'adaption aux changements climatiques 2013-2020. Ministère du développement durable, environnement et parcs, Québec, Québec.

Robert, B., Calan, R.D., Morabito, L., 2008. Modelling interdependencies among critical infrastructures. Int. J. Crit. Infrastruct. 4, 392–408. https://doi.org/10.1504/IJCIS.2008.020158

Robert, B., Hémond, Y., Cloutier, I., 2017. Un outil d'anticipation pour la résilience des infrastructures essentielles, in: Thomas, I., Da Cunha, A. (Eds.) La Ville Résiliente, Comment la Construire? Presses de l'Université de Montréal, Montreal, pp. 155–173.

Robert, B., Marty, M., Hémond, Y., de Serres, A., 2015. Analyses-diagnostics d'un potentiel de résilience d'une organisation. Sécurité Strat. 18, 54. https://doi.org/10.3917/sestr.018.0054

Robert, B., Morabito, L., 2009. Réduire la vulnérabilité des infrastructures essentielles: guide méthodologique. Lavoisier, Paris.

Serre, D., 2018. DS3 Model testing: assessing critical infrastructure network flood resilience at the neighbourhood scale, in: Fekete, A., Fiedrich, F. (Eds.), Urban Disaster Resilience and Security. Springer International Publishing, Cham, Switzerland, pp. 207–220. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68606-6_13

Serre, D., Barroca, B., Laganier, R. (Eds.), 2013. Resilience and Urban Risk Management. CRC Press, Boca Raton, FL.

Serre, D., Heinzlef, C., 2018. Assessing and mapping urban resilience to floods with respect to cascading effects through critical infrastructure networks. Int. J. Disaster Risk Reduct. 30. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.02.018

Toubin, M., 2014. Améliorer la résilience urbaine par un diagnostic collaboratif, l'exemple des services urbains parisiens face à l'inondation. Thesis, Université Paris Diderot. https://tel.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/958279/filename/toubin_these_memoire_2014.pdf

UN General Assembly, 2015. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction. https://www.unisdr.org/we/coordinate/sendai-framework

UNISDR, Center for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), 2015. The human cost of weather related disasters. 1995-2015. https://www.unisdr.org/files/46796_cop21weatherdisastersreport2015.pdf

4.2. Étude comparative pour élaborer un processus collaboratif d'opérationnalisation de la résilience : apports et limites

Cet article expose deux approches cherchant à se compléter pour opérationnaliser la résilience.

L'approche canadienne, tournée autour des enjeux des infrastructures critiques, a su développer un outil d'analyse des effets domino lors d'une inondation. Plusieurs scénarios sont créés afin de questionner les stratégies de résilience développées pour faire face au risque inondation. La résilience - et la résistance - des infrastructures critiques sont modélisées. Les résultats sont valorisés à travers l'outil d'aide à la décision DOMINO destiné aux municipalités canadiennes.

Parallèlement, l'approche française a développé une méthodologie tentant d'appréhender le territoire de façon plus globale en abordant les composants urbains et techniques associés aux composantes sociales. De manière holistique, une méthodologie fondée sur la mesure des potentiels de résilience a permis d'évaluer globalement une résilience inhérente au fonctionnement du territoire et de fournir un outil d'aide à la décision.

Ces deux outils offrent une première forme de réponse à la nécessité de clarifier et opérationnaliser la résilience urbaine. Cependant, certaines limites dans leur utilisation sont notables. C'est pourquoi, après avoir travaillé sur ces outils pour définir et opérationnaliser le concept, nous nous sommes concentrés sur la nécessité de travailler en collaboration avec les gestionnaires et les décideurs urbains pour aborder les questions liées au changement climatique et aux stratégies de résilience.

Cet article met l'accent sur l'apport de méthodes croisées testées à Montréal et à Avignon en utilisant des outils d'opérationnalisation et en développant des ateliers de sensibilisation. Après avoir présenté deux approches innovantes, tant dans leurs fondements théoriques (approche organisationnelle et approche globale) que dans leur mise en œuvre (collaboration avec les acteurs locaux) des ateliers ont été imaginés pour discuter les résultats et s'assurer de la bonne utilisation de ces outils. Ces ateliers ont eu pour visée de répondre aux faiblesses de ces outils, et d'enclencher une discussion, un débat entre experts et gestionnaires autour de la résilience et des outils d'opérationnalisation. Après avoir convié les gestionnaires des infrastructures critiques et des stratégies de gestion des risques, ces ateliers ont été organisés sur les deux territoires tests, Avignon et le Québec. Néanmoins, les résultats des ateliers visant à déterminer si les stratégies et les systèmes de gestion des risques d'inondation intègrent la résilience sont extrêmement mitigés. Bien que le concept lui-même soit connu et mentionné dans les discours officiels et individuels, son opérationnalisation et son intégration dans les objectifs, les actions, les stratégies à court, moyen et long terme n'en est qu'à ses débuts.

Toutefois, la mise en place de ces ateliers nous a permis de faire des progrès tangibles vers l'amélioration des outils de résilience. Si ces outils ont généralement connu des milieux

scientifiques, leur appropriation par les planificateurs n'est pas encore pleinement effective. Bien que les résultats en eux-mêmes soient mitigés, ils ont permis de construire une approche commune sur le long terme.

En effets, ces ateliers ont permis de confronter les conceptions académiques aux réalités pratiques à la question de la résilience et du changement climatique. La prise de conscience des limites qui persistent encore aujourd'hui permettra aux collectivités d'approfondir leur compréhension des enjeux de l'intégration du concept de résilience dans leurs pratiques territoriales. Les gestionnaires pourront ainsi faire face aux incertitudes climatiques et aborder certains des problèmes observés au cours des échanges. Par conséquent, ces outils spatiaux d'aide à la décision peuvent devenir aussi pertinents que possible pour faire face aux réalités et aux préoccupations et pratiques des intervenants. Enfin, ils peuvent aider à créer un pont entre les progrès scientifiques et les expériences réelles des aménageurs et gestionnaires locaux.

Cette recherche a donc permis de dépasser les outils de mesure et de modélisation de la résilience pour questionner leur utilisation et leurs avancées dans les pratiques. Ce travail ne sera néanmoins utile que si une démarche et un investissement sur le long terme se construisent. Un travail continu est donc à développer afin de faire fructifier les apprentissages de ces échanges entre gestionnaires et experts.

Partie 4

Discussion

Dans cette partie nous analyserons les apports théoriques et opérationnels de cette recherche. Nous présenterons également les limites relevées et les perspectives de ce travail.

Ce travail a également permis d'apporter des résultats opérationnels afin de fournir des clefs de lecture et d'analyse du concept de résilience. Ces résultats vont être remis en question afin de proposer des perspectives d'amélioration afin d'ancrer dans le temps l'opérationnalisation de la résilience.

1. Apports académiques

1.1. Objectifs initiaux

Face au constat de dérèglement climatique, d'augmentation des catastrophes, de la vulnérabilité des aires urbaines (*Partie Introductive*), et de la difficile traduction du concept de résilience en stratégie d'aménagement (*Partie 1 État de l'art : Méthodes et outils pour évaluer, modéliser et opérationnaliser la résilience*). Le travail de thèse a cherché à construire une méthodologie pour répondre aux enjeux de l'opérationnalisation du concept (Figure 76) et favoriser l'aide à la décision.

L'objectif a donc été de construire un système spatial d'aide à la décision, proposant une (re)définition de critères de résilience, la construction d'indicateurs de mesure à l'échelle locale, la modélisation de la résilience et la construction d'une démarche collaborative.

Constats	Objectifs	Résultats	Perspectives
• Augmentation des incertitudes dans un contexte de dérèglement climatique • Augmentation des inondations en milieux urbains • Incompréhension du concept de résilience de la part des acteurs locaux • Etudes de la résilience tournée autour de l'approche technico-fonctionnelle • Résilience étudiée post-catastrophe	• Répondre aux limites de l'opérationnalisation de la résilience • Evaluer le potentiel de résilience sur un temps long • Favoriser l'adoption du concept de résilience en travaillant avec les acteurs locaux • Améliorer la compréhension du concept de résilience	• Elaboration d'un partenariat socio-économique avec le Service SIG de la ville d'Avignon • Définition de trois indicateurs de résilience • Construction d'une base de données de résilience • Conception d'un système spatial d'aide à la décision • Elaboration d'ateliers avec les gestionnaires locaux • Activités de vulgarisation pour développer une culture de résilience	• Développer un plugin QGIS • Développer d'autres indicateurs notamment autour de la question de gouvernance • Élaborer une collaboration longue durée avec les acteurs locaux • Tester la méthodologie sur d'autres territoires • Tester la méthodologie sur d'autres aléas • Développer une approche globale via la conception d'un observatoire de résilience

Figure 76 : Évolution de la thèse, constats, objectifs, résultats et perspectives

1.2. Résultats académiques

La démarche s'est appuyée sur des méthodes des sciences humaines et sociales (analyse des pratiques et discours des acteurs locaux), des sciences cognitives (description, simulation et analyse du système complexe urbain afin d'acquérir, utiliser et conserver les connaissances), et la géomatique (méthodes de géovisualisation afin d'analyser, produire et transmettre les résultats).

1.2.1. Redéfinir la résilience

D'un point de vue académique, cette recherche a permis de réinterroger le concept de résilience et les notions qui y sont liées dans le domaine des risques. L'état de l'art a permis de mettre en lumière les limites de l'analyse de la résilience. Dans la gestion des risques, la résilience est souvent abordée post-crise afin d'analyser les éléments vulnérables et/ou résilients dans l'espace urbain. L'analyse se fait donc après une catastrophe pour évaluer les réponses des éléments urbains et sociaux.

La méthodologie élaborée dans ce travail a permis de repositionner le concept de résilience sur un temps long. Cette redéfinition du concept a permis de concevoir un cadre conceptuel de résilience associant des caractéristiques de résilience en associant des notions de vulnérabilités. Aborder la résilience sur un temps long permet de réinterroger les capacités de résilience et les fractures intrinsèques au système urbain.

En outre, l'opérationnalisation de la résilience passe nécessairement par une réappropriation du concept de la part des gestionnaires et acteurs locaux. Ce travail de recherche a donc élaboré une méthodologie collaborative afin de travailler conjointement sur la définition et les objectifs du concept de résilience (Figure 77).

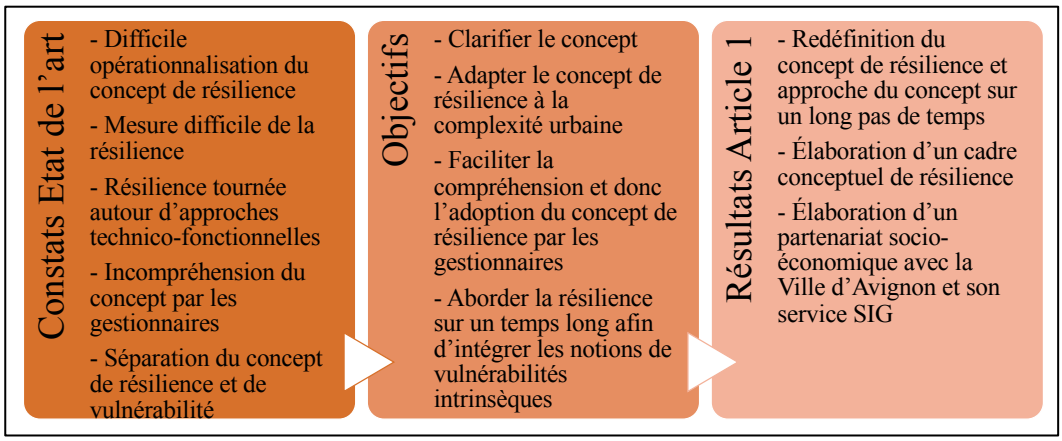

Figure 77 : Résultats obtenus dans l'article 1

1.2.2. Mesurer la résilience

Afin d'aborder la thématique des risques en milieux urbains, le choix a été fait d'analyser la résilience sur un temps long, et non plus uniquement à la suite d'un choc. Cette prise de position a permis de comprendre les éléments déterminants dans la conception d'une stratégie de résilience. Ce questionnement et cette tentative de définition a permis d'approfondir le cadre

conceptuel de résilience. Grâce à l'identification de ces éléments, trois indicateurs ont été construits pour aborder le territoire à travers les composantes sociales, urbaines et techniques :

- **Un indicateur de résilience urbaine** : On parle de résilience urbaine pour définir toutes les dynamiques urbaines – physiques comme les bâtiments (âge du bâti par exemple) et les infrastructures critiques – ou virtuelles comme les dynamiques économiques (installation ou disparition de biens commerciaux). Nous avons analysé les zones d'influence des infrastructures critiques, l'accès aux infrastructures médicales et la dynamique touristique et économique.

- **Un indicateur de résilience sociale** : La résilience sociale est définie ici comme la capacité d'une population à d'adapter et à se remettre d'une perturbation. Plusieurs facteurs peuvent permettre à une population d'agir de manière proactive, de réagir et de redévelopper des activités et interactions après une crise. Ces facteurs peuvent être l'âge, le statut socio-économique, le niveau d'éducation, les habitudes, les aides de l'État etc. Dans cette analyse, la résilience sociale est abordée comme une résilience communautaire et non pas individuelle.

- **Un indicateur de résilience technique** : Comme établi précédemment, les réseaux urbains sont essentiels dans l'analyse de la résilience. Ils sont nécessaires au bon fonctionnement d'une ville, reliant de plus en plus de personnes et de territoires et offrant ainsi une variété de ressources et d'opportunités. Pourtant, ils peuvent aussi créer des situations d'interdépendance et propager les inondations au-delà des frontières géographiques et fonctionnelles. Dans cette analyse, nous intégrons à la fois la diversité des réseaux (le nombre de réseaux différents sur un rayon de 100 m) et l'accessibilité de ces réseaux (la longueur en mètres du nombre de routes publiques sur un rayon de 100 m).

Suite à la co-identification de ces indicateurs, un script informatique de transformation, traitement et valorisation de donnés a été co-conçu. Ce script effectué à l'aide des outils FME et QGIS a permis de mesurer et de cartographier deux des indicateurs (résilience sociale et urbaine) à l'échelle des IRIS de la ville d'Avignon.

Aborder la résilience sous un angle exhaustif a permis d'avoir une vision plus complète du milieu urbain et des risques qui y sont liés (Figure 78).

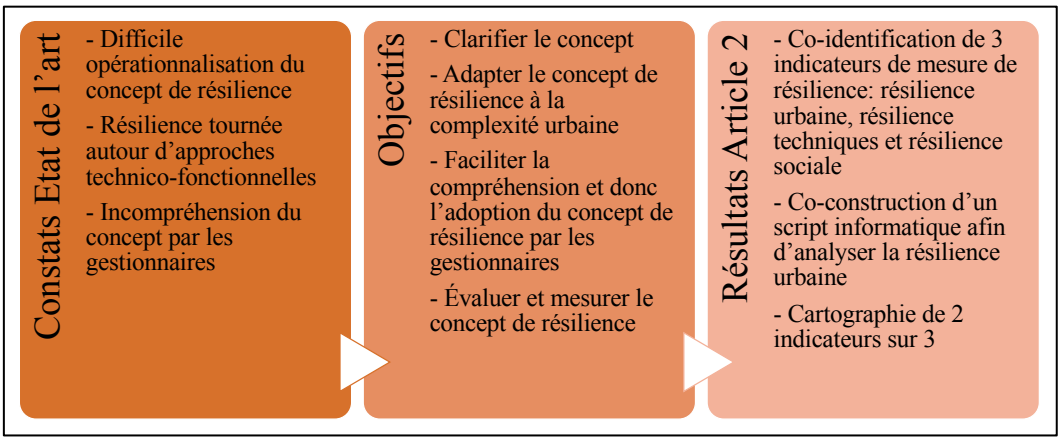

Figure 78 : Résultats obtenus dans l'article 2

1.2.3. Concevoir un système spatial d'aide à la décision

Face au constat du manque d'intégration des modèles de résilience dans des stratégies de gestion des risques, nous avons cherché à une approche possible du concept de résilience. Après avoir construit un modèle conceptuel de résilience et trois indicateurs de mesure, il a été décidé d'utiliser les techniques de géovisualisation afin d'opérationnaliser le concept de résilience. Les techniques de géovisualisation regroupent les pratiques de visualisation, de cartographie, d'analyse et de production de données etc. afin de participer à la prise de décision.

L'outil de traitement (FME) utilise donc une interface et non plus des lignes de codes, ce qui rend le script informatique plus accessible et compréhensible (Figure 79).

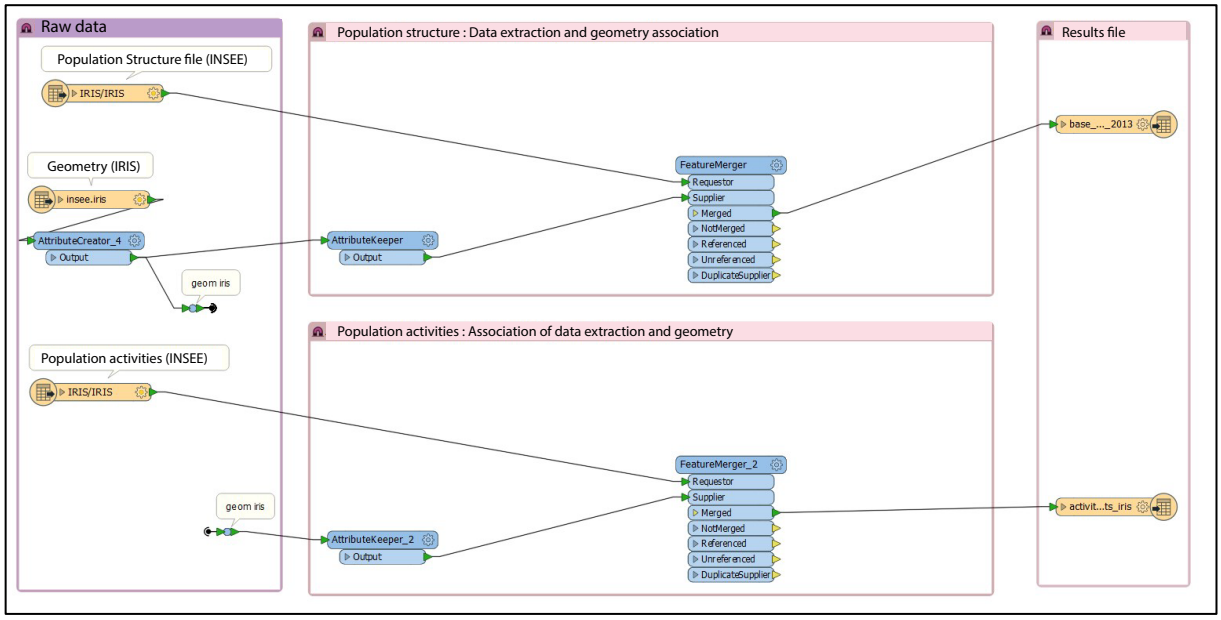

Figure 79 : Exemple de l'interface de l'outil FME

En outre, l'accessibilité, l'actualisation et la réutilisation des données est favorisée par l'utilisation à 90% de données en libre accès (INSEE). Cette volonté de « transmettre » cette recherche au-delà de la thèse même s'est entrevue dans le choix de *l'open data* et des outils en

open access. Cette volonté de promouvoir les résultats s'explique par le constat de l'incompréhension du concept par les aménageurs. Utiliser des données connues, gratuites et accessibles permet de favoriser la compréhension et l'utilisation de la méthodologie établie. L'*open data* et les outils en *open access* permettent de « libérer » les connaissances et savoirs construits (Goëta and Mabi, 2014 ; Janssen et al., 2012).

L'originalité de la méthode s'exprime par la modélisation à l'échelle locale des éléments de résilience urbaine, technique et sociale, modélisation qui s'est effectuée en collaboration avec les acteurs locaux. Cette collaboration ne s'est pas effectuée a posteriori de la conception du système spatial d'aide à la décision mais à chaque étape. En outre, chaque étape du script, les données utilisées et les résultats sont facilement compréhensibles et accessibles grâce aux choix des outils et données (Figure 80).

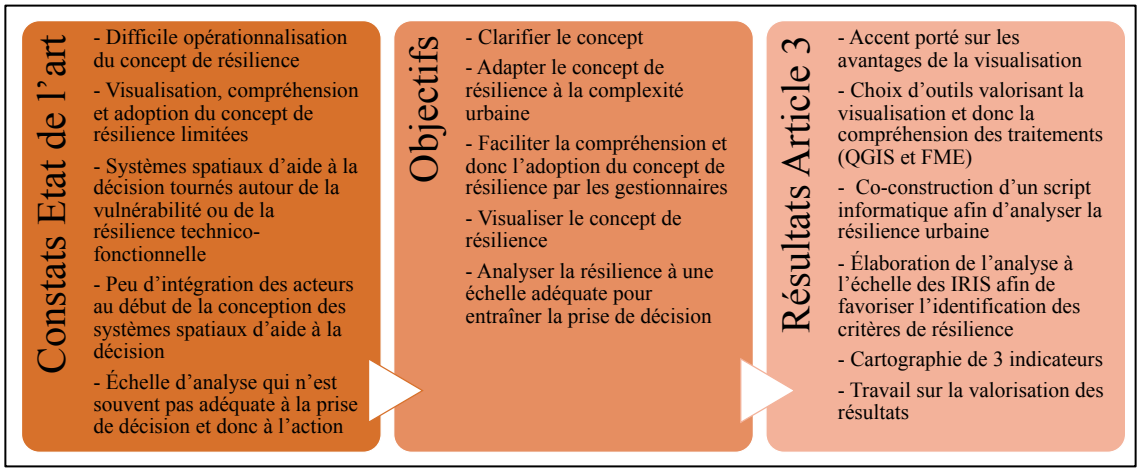

Figure 80 : Résultats obtenus dans l'article 3

1.2.4. Approche collaborative

Cette démarche a été pensée, construite et consolidée à l'aide d'une collaboration avec les acteurs urbains et techniques de la collectivité d'Avignon. Construire cette méthodologie avec les acteurs locaux a permis de s'assurer de la compréhension de la démarche et des résultats mais aussi s'assurer de la concordance entre l'approche et la culture du risque locale. Ce point permet d'envisager une pérennisation mais aussi une amélioration constante de la démarche.

La co-réflexion autour des indicateurs, l'échange des données, l'utilisation d'outils connus et d'ores et déjà utilisés par les gestionnaires locaux a permis d'intégrer les acteurs au cœur de la réflexion et de la construction du système spatial d'aide à la décision. En outre, via la création d'ateliers tout au long de la recherche afin de présenter les résultats a permis de les nuancer face aux pratiques et connaissances des acteurs locaux. En outre, ces ateliers ont permis de relancer une réflexion de la part des acteurs locaux autour de la gestion des risques, de la résilience et de son opérationnalisation. Cette démarche s'est poursuivie par des activités de vulgarisation afin de développer une culture de résilience. Développer une culture de résilience

afin de construire des stratégies de gestion des risques est essentiel pour préparer les territoires à l'augmentation des catastrophes.

Cette démarche a permis d'intégrer, au début de la réflexion, les acteurs locaux afin d'adapter l'analyse et la mesure de la résilience aux pratiques de gestion des risques locales. Les habitudes techniques (outils et données) ont été intégrées dans la méthodologie afin de favoriser l'appropriation du système spatial d'aide à la décision par les gestionnaires. Cette collaboration a permis de questionner la gestion des risques cloisonnée et de construire une réflexion collective sur le processus de résilience. En outre, la confrontation entre deux approches visant à opérationnaliser la résilience a permis de présenter aux acteurs les différents outils et positionnements concernant la résilience. Cela a permis de mettre en perspective les outils et les réalités pratiques des gestionnaires (Figure 81).

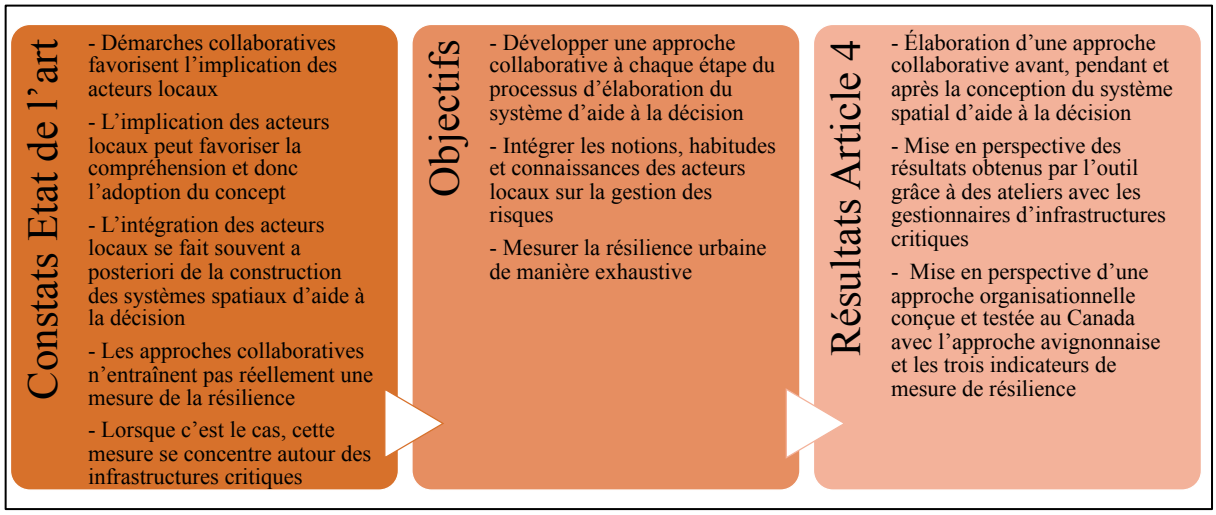

Figure 81 : Résultats obtenus dans l'article 4

1.3. Apports dans le domaine de recherche

Les résultats ont permis de se positionner dans le domaine de recherche et de proposer des pistes d'améliorations sur la question de l'opérationnalisation de la résilience.

1.3.1. Définir la résilience

La redéfinition de la résilience urbaine a permis de répondre à plusieurs limites observées dans la *Partie 1 État de l'art, Méthodes et outils pour évaluer, modéliser et opérationnaliser la résilience*. Comme évoqué, la résilience est régulièrement analysée post crise. Afin d'opérationnaliser, quantifier, objectiver, mesurer la résilience, celle-ci est souvent analysée à travers l'évaluation de la résilience des infrastructures urbaines. Enfin, lorsqu'elle est définie, la résilience fait souvent opposition à la vulnérabilité, créant une rupture entre les deux concepts.

La méthodologie développée dans ce travail a permis de répondre à ces limites. Tout d'abord, la définition de la résilience élaborée a permis d'appréhender la résilience sur un long pas de temps et, de ce fait, réintégrer les notions de vulnérabilités et résiliences intrinsèques. La

résilience n'est plus en opposition avec la vulnérabilité et ne s'analyse plus uniquement post-crise mais selon un continuum de temps.

1.3.2. Évaluer la résilience

Les limites observées faisaient état d'une difficile élaboration d'indicateurs de vulnérabilité et/ou de résilience. Dans de nombreuses approches, le choix était fait d'évaluer soit la vulnérabilité, soit la résilience, sans créer de lien entre les deux concepts. Le fait d'avoir choisi d'aborder la résilience selon un temps long permet de faire le lien entre vulnérabilité et résilience. En effet, analyser *a priori* les composantes territoriales et sociales permet d'identifier les éléments fragiles d'un territoire, éléments qui peuvent remettre en question la résilience post-crise.

Outre le fait d'intégrer la notion de vulnérabilité, cette recherche permet de répondre aux limites des indicateurs de résilience déjà observées. La majorité des recherches sont centrées autour de la composante technico-fonctionnelle de la résilience ce qui ne traite qu'une partie du problème. La méthodologie a permis d'aborder les différentes caractéristiques du milieu urbain : les aspects urbains, techniques mais aussi sociaux.

Enfin le choix de l'échelle d'analyse a permis de compléter les approches existantes. Les indicateurs existants de vulnérabilité et/ou de résilience ont pour majorité une échelle d'analyse étatique. Cette échelle ne facilite pas la compréhension, l'appropriation du concept et donc la prise de décision pour intégrer la résilience dans les stratégies de gestion des risques. Lorsque l'échelle est plus fine, l'analyse de la résilience se concentre autour de la question des réseaux urbains. L'apport de cette recherche est donc de proposer une analyse globale de la résilience à l'échelle urbaine.

1.3.3. Modéliser la résilience

Modéliser la résilience et/ou la vulnérabilité a été tenté dans de nombreuses approches. Les observations faites de ces précédentes méthodologies ont été que les systèmes spatiaux d'aide à la décision peinent à aborder les deux concepts de façon générale. La plupart des modélisations ne rendent pas accessibles leurs traitements ou leurs bases de données. La résilience se limite également à une analyse technico-fonctionnelle en intégrant les enjeux des effets domino.

Cette recherche a permis de concevoir un système spatial d'aide à la décision permettant la visualisation, la compréhension et l'accessibilité des traitements et des résultats pour les acteurs locaux. La conception s'est réalisée en collaboration, permettant aux acteurs locaux de s'intégrer à la méthodologie, mais aussi de partager leurs expertises. Cette méthodologie répond donc aux limites observées, à savoir que les acteurs étaient intégrés après la conception des systèmes spatiaux d'aide à la décision.

De plus, ce système spatial d'aide à la décision a intégré le concept de résilience mais en insérant les notions de vulnérabilité. Les deux concepts ne sont plus en opposition et sont analysés dans un seul et même outil, ce qui diffère des approches précédentes. Enfin la résilience n'est plus modélisée simplement à travers les composantes techniques. Le système

spatial d'aide à la décision permet d'évaluer et cartographier la résilience urbaine, technique et sociale.

1.3.4. Développer des stratégies collaboratives

Les stratégies collaboratives permettent de construire une connaissance commune autour d'un concept complexe. Cela permet de débattre, décortiquer et opérationnaliser des concepts abstraits. Cette recherche a permis de construire un système spatial d'aide à la décision avec et pour les gestionnaires urbains. Le constat est que la majorité des approches collaboratives s'établissent une fois que le système est conçu afin de demander l'avis aux acteurs locaux. Dans cette recherche, la collaboration s'est établie au moment d'établir les indicateurs. Cette dimension temporelle a favorisé l'intégration et l'acceptation de l'outil. Les données et outils utilisés ont été choisi car ils étaient d'ores et déjà connus par le Service SIG de la Ville. Les choix des indicateurs et sous-indicateurs s'est donc fait grâce à la confrontation de la recherche scientifique et des compétences et habitudes techniques du Service. Les outils ont également été valorisés par l'expérience d'utilisation du service. Favoriser et conforter les acteurs dans leurs habitudes et leurs repères a contribué à l'acceptation de la démarche et de la méthodologie.

Une fois le système spatial d'aide à la décision conçu, des ateliers ont été élaborés pour initier des discussions autour des résultats. Ces ateliers ont participé au développement d'une culture du risque, notamment à travers un réseau entre universitaires et gestionnaires d'infrastructures critiques. Ce réseau a permis de mettre en relation deux approches afin de comparer et mettre en perspective la recherche avignonnaise avec une recherche canadienne.

> ***Ce travail de recherche a permis de lever plusieurs verrous concernant le concept de résilience. Tout d'abord sur l'aspect théorique et académique, la nécessité d'analyser ce concept sous un angle exhaustif a permis de comprendre les potentiels de résilience intrinsèques au fonctionnement interne d'un territoire urbain et de sa population. La résilience est désormais abordée dans toute sa complexité et sa globalité.***

1.4. Des limites identifiées

Malgré les avancées notables de ce travail de recherche, certaines limites ont été notées.

Dans un premier temps, la cartographie de la résilience technique n'a pas été présentée dans les résultats ni aux acteurs locaux. Cette cartographie a été réalisée en interne mais n'a pas encore été intégrée au système spatial d'aide à la décision.

Concernant l'évaluation de la résilience, d'autres indicateurs pourraient être intégrés pour développer l'approche globale du concept de résilience. Les composantes environnementales pourraient davantage contextualiser l'analyse de la résilience en fonction d'un territoire précis. Des éléments comme la couverture forestière, le bassin versant, le type de relief permettraient d'avoir une analyse contextualisée du risque. Une autre limite académique repose sur l'évaluation de la résilience sociale. Si les composantes techniques et urbaines sont facilement quantifiables et peuvent donc être rapidement optimisées, la résilience sociale pose encore question. Ce travail a fait le choix de quantifier la résilience sociale par des données quantitatives et représentées sur tout le territoire national. Or, de nombreuses données ne sont pas nécessairement accessibles telles que la cohésion sociétale, notamment à travers l'implication dans des associations, dans le politique. Quantifier et donc opérationnaliser de manière exhaustive ces composantes et interactions sociales est donc limité. Il faudrait, de ce fait, réintégrer une dimension qualitative des données. En outre, la dimension sociale pose la question inévitable des inégalités qui se trouvent fréquemment renforcées après une perturbation. Analyser l'investissement et les choix politiques dans ce contexte permettrait de construire une vision stratégique sur le long terme du territoire et de sa résilience.

La méthodologie s'est concentrée sur la question du risque d'inondation, mais d'autres risques impactent durablement l'espace urbain, risques ponctuels ou présents durablement. Un élargissement vers d'autres risques pourrait être également souhaitable dans un contexte de dérèglement climatique et d'augmentation des risques dans le milieu urbain.

Enfin, l'approche s'est centrée sur un seul cas d'étude français. Un élargissement au niveau spatial mais aussi en intégrant des compétences développées par d'autres approches (telle que l'approche canadienne) pourraient enrichir l'analyse de la résilience et son évaluation.

1.5. Perspectives de recherche

Plusieurs perspectives de recherche peuvent être envisagées, concernant l'approche, la méthodologie ou encore le format de l'outil (Figure 82).

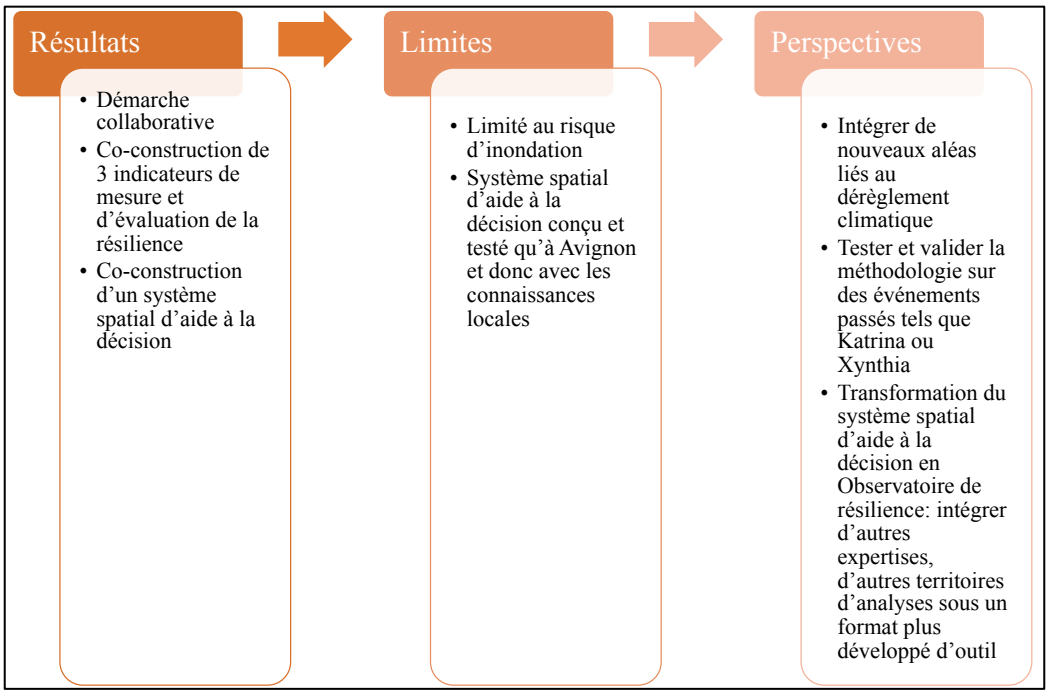

Figure 82 : Perspectives d'améliorations sur le plan académique

1.5.1. De nouveaux risques

Afin de poursuivre cette recherche, une évolution vers de nouveaux risques semble pertinent. Étant donné qu'un intérêt a été porté sur la notion de temporalité et de temps long, de fracture interne au territoire et à sa population, la question des risques – ou plutôt des stress-quotidiens doit s'insérer davantage dans l'étude.

Intégrer des risques climatiques différents serait une amélioration non négligeable. La question de vague de chaleur en milieu urbain, ou encore de monter des eaux pour les zones côtières seraient propice à une recherche tournée sur le dérèglement climatique.

Analyser les failles internes seraient également intéressant. Des questions sociales telles que le taux de chômage, l'âge moyen de la population ou encore la part d'individus bénéficiant d'aides de l'État seraient à analyser spécifiquement. Outre ces failles, en partie analysées dans cette recherche, des fragilités territoriales devraient être intégrées, tels que les îlots de chaleur urbains, la part de logements sociaux, les trames vertes et bleues, les moyens de transports en commun, etc. Ces éléments font partie de la qualité de vie d'un citadin et conditionnent donc leur réponse face à une crise. Plus la qualité de vie, l'environnement, les moyens mis en place par la collectivité de se préparer à un événement perturbateur seront importants, plus la résilience aura des chances d'être élevée avant, pendant et après un choc.

Cette méthodologie permettrait d'aborder de nouveaux aléas pour plusieurs raisons. Tout d'abord, l'inondation n'a pas été intégré en tant que perturbation physique avec une probabilité de récurrence, une hauteur d'eau ou un débit précis. L'approche est avant tout globale et peut donc s'appliquer à d'autres aléas naturels. En outre, l'approche sur le long terme de la résilience favorise l'intégration de perturbations et vulnérabilités quotidiennes telles que le taux de chômage, le dynamisme économique etc. En effet, la survenue d'une catastrophe reste ponctuelle dans le temps et lutter contre les stress quotidiens peut favoriser une meilleure préparation et un équilibre plus stable afin d'affronter au mieux la survenue d'une catastrophe.

1.5.2. Valider l'approche sur des catastrophes passées

Tester et valider la méthodologie sur des événements passés dont on connaît déjà plus ou moins la résilience serait intéressant pour nuancer et mettre en perspective les indicateurs et leur mesure. Les travaux d'ores et déjà établis sur la Nouvelle Orléans ou sur l'impact de l'ouragan Sandy permettent d'avoir une idée plus ou moins précise des éléments vulnérables ou des composantes résilientes du territoire urbain. Appliquer la méthodologie avignonnaise sur ces territoires permettraient de vérifier l'exactitude de l'approche et des résultats et confronter la méthodologie à la réalité d'une catastrophe précise.

1.5.3. Un système spatial d'aide à la décision à travers la conception d'un observatoire de résilience

Au-delà de réfléchir à intégrer de nouveaux risques, la question de la forme de l'outil demeure. Comment faire perdurer la réflexion autour de la résilience via une approche dynamique, systémique et en adéquation avec les nouvelles formes urbaines et incertitudes qui y sont liées. Les systèmes d'informations (SI) sont « *un ensemble organisé de ressources (matériels, logiciels, personnel, données et procédures) qui permet de regrouper, de classifier, de traiter et de diffuser de l'information sur un environnement donné* » (De Courcy, 1992). L'information transmise peut découler directement des données dites brutes ou de leur phase de traitement. Toute discipline ou thème peut être abordé et traité par les SI. Du fait de l'accumulation des nombreuses informations et de la différence de méthodologie pour structurer et stocker les données, la diffusion et l'accès aux SI est extrêmement complexe (Desconnets *et al*., 2003). La mondialisation et la globalisation des données grâce à internet et aux réseaux sociaux ajoutent à la difficulté d'utiliser cette quantité phénoménale de données. Plusieurs outils ont donc tenté de clarifier l'afflux d'informations, de les classifier et de les rendre plus lisibles pour les utilisateurs. Les observatoires font partie de ces nouveaux outils pour diffuser et partager l'information. Le terme « observatoire » est utilisé dans de nombreuses disciplines avec des interprétations diverses et variées (Dzeakou and Derniame, 2000). Les observatoires se construisent soit autour d'une thématique (risques, environnement, etc), soit autour d'une échelle prédéfinie (territoire nationale, régions, agglomérations, collectivités ou encore échelle d'un projet précis). Leur objectif reste cependant le même, collecter l'information via la pratique de l'observation et la restituer de manière à ce qu'elle soit traitée et utilisée par les acteurs du territoire (de Sède-Marceau *et al*., 2009).

En effet, avant les années 90, les systèmes d'observation étaient déployés au niveau international, sur la base d'observatoires scientifiques de l'Univers dédiés à la surveillance des paramètres de la science de l'univers (planètes, climat, atmosphère et risques, ces observatoires sont pilotés par des chercheurs (Loireau et al., 2015). A partir des années 90, des observatoires ont été progressivement mis en place pour les questions environnementales, y compris les nouvelles sciences comme les sciences naturelles et les sciences humaines. En France, cette période correspond au développement des observatoires du CNRS comme l'OHM (Observatoire de l'Environnement et des Sociétés)(Loireau and Miralles, 2017). Face à la mondialisation et au changement climatique, les chercheurs utilisent les observatoires pour

suivre les tendances spatiales et temporelles (de Sède-Marceau et al., 2009; de Sède-Marceau and Moine, 2012) et améliorer les connaissances sur des territoires spécifiques. Avec des observations continues, il est admis que la connaissance et la compréhension sont améliorées, y compris les processus conduisant à de telles évolutions. Les territoires sont en train de devenir centraux dans les observatoires et l'interdisciplinarité est désormais la règle, avec de nouveaux partenariats rassemblant chercheurs et utilisateurs finaux. D'autres types d'observatoires sont mis en place pour s'attaquer à certaines questions techniques pour lesquelles les priorités sont l'échange d'informations en vue du développement. Dans ce cas, les chercheurs sont toujours absents de ce processus. En conséquence, certains observatoires sont parfois partiellement redondants sur un même territoire et une question de recherche se pose sur le développement de nouvelles structures d'observatoires permettant une approche mixte utile tant pour le territoire lui-même que pour un large éventail d'acteurs. La nécessité d'acquérir des informations précises au vue d'améliorer l'aménagement découle de l'évolution des rapports de forces territoriaux. Les territoires et acteurs évoluent très rapidement, du fait des changements politiques, environnementaux, démographiques, spatiaux, organisationnels, etc. Ces changements rapides entraînent un besoin d'information et d'observation grandissant pour comprendre ces systèmes complexes que sont les territoires. Les observatoires se présentent alors comme des outils bénéfiques à la compréhension, des outils d'aide à la décision pour les aménageurs et élus. Ces outils, qui se situent à « *l'interface entre la réalité complexe et la connaissance* » (de Sède-Marceau and Moine, 2012) doivent retranscrire avec précision les évolutions territoriales et sociales observées. Ces observatoires sont composés d'information « réelles » découlant de l'observation humaine et de traitement de ces données. Ce traitement permet de mesurer, de coder, de calculer et d'exploiter les données « observées » en vue de modéliser les évolutions du territoire et d'améliorer leur compréhension. L'utilisateur peut davantage analyser les changements et les interrelations grâce à un modèle de traitement qui décortique chaque échelle et liens entre données. En partant d'une observation réelle, l'observatoire en vient à *produire* une information et de ce fait, une connaissance. Ces outils polymorphes et polysémiques sont un support utile pour créer un outil d'aide à la décision, apportant des connaissances nouvelles à différentes échelles. La multitude de formes de diffusion et d'interactions (simulation, cartographie, indicateur, alertes, commentaires, échanges, etc.), fait de cet outil dynamique un choix de maître pour l'aide à la décision territoriale.

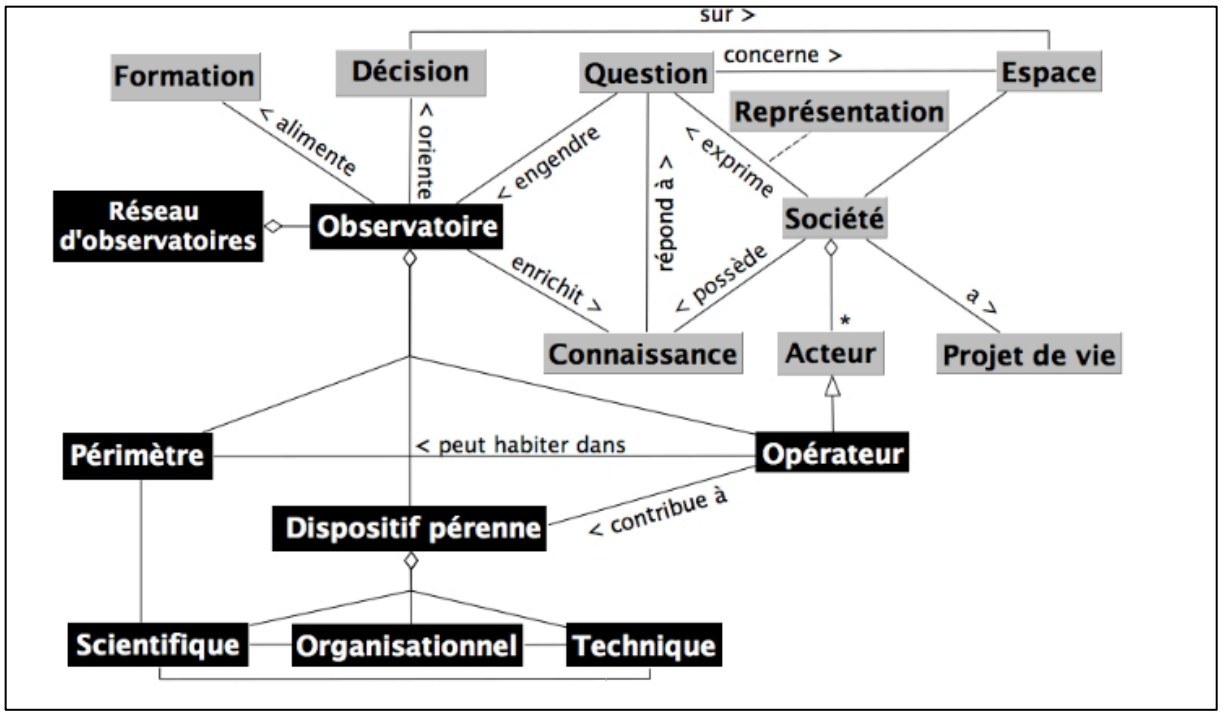

Figure 83 : Un outil en interrelation entre le monde scientifique et son opérationnalisation pratique. (Loireau, 2017)

Ces principes de l'observatoire sont basés sur des systèmes d'information (spatiale), dont l'un des objectifs est de soutenir les décisions spatiales (Gayte et al., 1997). Quelle que soit la question soulevée, ces observatoires peuvent inclure des connaissances scientifiques et un suivi, ainsi qu'un moyen de rendre opérationnels les processus de décision avec les acteurs concernés.

Dans la poursuite de cette thèse, construire un observatoire de résilience urbaine serait une perspective très intéressante. Ce travail de thèse se poursuivra donc dans le cadre d'un contrat d'ATER (Attachée Temporaire d'Enseignement et de Recherche) à l'Université de Polynésie Française. Construire un prototype d'Observatoire de résilience sur les îles du Pacifique prend alors tout son sens face aux risques auxquels elles sont soumises. Les îles françaises d'outre-mer cumulent de forts aléas hydrométéorologiques avec des méthodes, outils et stratégies de gestion des risques bien souvent inadéquates. Cette déclaration provient d'un rapport du gouvernement français de 2014 expliquant que les îles françaises d'outre-mer sont des zones à haut risque, sans systèmes de gestion des risques performants et avec un manque de moyens consacrés à cette question. Les inondations (fluviales, pluviales, tsunamis et submersions) sont parmi les problèmes les plus critiques pour la plupart des îles. L'amélioration de la résilience aux risques d'inondation dans une telle zone est donc un enjeu essentiel. Pour atteindre cet objectif, nous proposons une approche en deux étapes :

- Modéliser le niveau de résilience aux inondations et aux effets en cascade de deux îles de Polynésie française (Tahiti et Moorea) en concentrant les enjeux importants pour les Polynésiens. Pour ce faire, nous visons à tester et à améliorer, si nécessaire, les modèles de résilience développés dans d'autres contextes tels que celui construit et testé à Avignon.

- Concevoir des moyens à long terme à travers un observatoire du risque et de la résilience pour accumuler et partager les connaissances, puis développer des fonctions permettant aux

décideurs de choisir les options résilientes les plus intéressantes pour préparer et adapter ces îles aux événements extrêmes.

A la fin du projet, il est prévu d'avoir une première idée du niveau de résilience aux inondations de ces îles et une liste préliminaire des fonctions d'un tel observatoire. Un tel prototype d'observatoire de résilience développé pour Moorea et Tahiti pourrait aider les décideurs à planifier de manière stratégique l'aménagement du territoire dans une perspective à long terme.

Ce projet d'Observatoire de résilience répond à plusieurs enjeux et crée un lien entre des recherches antérieures et futures. Les constats établis dans les recherches précédentes sur la résilience démontrent des limites réelles de l'opérationnalisation du concept, limites liées notamment à la définition claire des objectifs de résilience. Plusieurs recherches antérieures ont tenté de pallier ces limites et biais en retravaillant sur les critères de résiliences, critères qui doivent s'adapter à l'approche systémique d'un territoire afin de prendre en compte toute la complexité de ces dynamiques spatiales et sociales. La recherche holistique a été construite et testée sur le territoire inondable d'Avignon (France). Les résultats de cette étude ont démontré la nécessité et la faisabilité de construire une méthodologie collaborative avec les acteurs de la ville afin de définir, analyser et cartographier des degrés de résilience autour de trois thématiques, urbaine, technique et sociale. Forte de cette analyse, de ces premiers constats et des résultats bénéfiques pour la collectivité, l'objectif a dès lors été de développer et d'approfondir l'approche en construisant une stratégie plus globale sous le prisme d'un Observatoire de résilience testé sur les territoires insulaires vulnérables.

La nécessité d'innover dans les approches de gestion des risques s'explique notamment par la prise de conscience du manque de considération de ces territoires vulnérables. En effet, en septembre 2014, un rapport interministériel français traitant des risques des inondations éclairs a montré que les territoires français d'outre-mer sont très concernés par les crues subites mais que ce risque est mal traité par le gouvernement national et les autorités locales (Bourgeois et al., 2015). En effet, l'outre-mer est fortement exposée aux ouragans, séismes et tsunamis, mais les crues éclair qui en résultent ne sont pas suffisamment prises en compte par rapport à l'hexagone français. Pourtant, plusieurs facteurs combinés des territoires d'outre-mer, tels que la géographie, le climat, les contraintes d'aménagement du territoire et les structures sociales, augmentent la vulnérabilité aux crues soudaines et aux risques en général à un niveau supérieur. Le rapport met également en évidence un difficile partage des responsabilités entre les autorités nationales et locales en ce qui concerne les processus de mauvaise gestion des risques avec notamment un point crucial : l'observatoire national des risques ne couvre pas les territoires d'outre-mer. Dans le même temps, les autorités locales ne semblent pas disposées à s'engager pleinement dans la gestion des risques, à l'exception des questions liées aux ouragans en raison d'une bonne culture de la population face à ces dangers. Un problème plus critique est l'absence de contrôle des terres et du développement urbain par les autorités locales. Le rapport contient également des recommandations visant à améliorer les stratégies de gestion des risques dans les régions d'Outre-Mer telles que l'ambition de transformer l'outre-mer en territoires d'innovation pour la gestion des risques en engageant les communautés scientifiques et faire de

l'urbanisme une mesure non structurelle pour réduire les risques en prenant davantage en compte les incidences du changement climatique.

Le projet d'un observatoire permettra donc de concevoir un cadre pour répondre aux besoins en termes d'avancées scientifiques, techniques, sociales et territoriales. Ainsi, le prototype d'observatoire est novateur à plusieurs échelons ; répondre à un besoin évalué (intensité et récurrence des catastrophes) par une solution qui n'existe pas encore, la réalisation de l'observatoire avec de nouveaux modèles permettant d'évaluer le niveau de résilience aux inondations dans une perspective multi-échelle (espace et temps) et utiliser autant que possible des outils, des données et des solutions open source afin de minimiser le coût de l'observatoire et de maximiser son utilisation future.

2. Apports opérationnels

2.1. Objectifs initiaux

Les objectifs initiaux de cette thèse étaient de développer un outil visant à fournir un support de discussion scénarisé qui permettrait de replacer la question de la résilience et du risque d'inondation au sein des enjeux d'aménagement et de stratégies de gestion des risques.

2.2. Résultats opérationnels

La méthodologie a permis d'établir plusieurs résultats opérationnels. Tout d'abord, la conception de trois indicateurs de mesure a conduit à la création d'une base de données autour du concept de résilience. Cette base de données permet de développer et opérationnaliser les capacités de résilience sur le territoire avignonnais. Les données sont évolutives et facilement accessibles. Le concept de résilience a donc été clarifié pour les gestionnaires et acteurs locaux. Une identification claire et simple des facteurs favorisant la résilience a permis d'identifier des objectifs sur lesquels il faudrait agir pour accroître la résilience urbaine.

Sur l'apport du système spatial d'aide à la décision, les résultats sont la production d'un script informatique, mais aussi d'une cartographie développée. L'accessibilité et la visualisation du script permet une meilleure compréhension des traitements et donc leur potentielle amélioration. La cartographie de la résilience permet de géolocaliser les capacités de résilience ou les éléments vulnérables sur lesquels travailler. Cette cartographie est essentielle pour localiser spatialement les éléments vulnérables ou résilients afin d'entraîner un réaménagement potentiel de l'espace urbain ou du moins d'équilibrer les ressources équitablement.

Enfin l'approche collaborative a permis d'amorcer le développement d'une culture de résilience. Que ce soit à travers la conception du système spatial d'aide à la décision, ou grâce à l'élaboration des ateliers de concertation, la méthodologie a permis de confronter les expertises, les points de vue, les connaissances et les priorités de chaque acteur. Cette

« démocratisation » du terme, ce transfert et ce partage de connaissance ont permis d'établir une base afin d'aider à la décision et entraîner sur le long terme une action.

2.3. Apports pour la Ville d'Avignon

Les apports pour la Ville d'Avignon sont d'ores et déjà observables. Tout d'abord, la base de données de résilience a permis de visualiser de nombreuses composantes territoriales et sociales telles que l'inégale accessibilité aux infrastructures critiques, les territoires dynamiques caractérisés par des populations jeunes ou par la création d'entreprises, etc. Le fait de souligner des éléments constitutifs du territoire a permis aux aménageurs de s'appuyer sur cette base de données pour développer d'autres thématiques. Cette base de données sert donc à la réflexion et l'élaboration en interne d'un indicateur de bien être urbain, indicateur qui s'appuie sur les données de résilience sociales.

La cartographie de résilience a également favorisé les débats entre gestionnaires d'infrastructures critiques et responsables de la gestion des risques. Les cartes produites ont permis de relancer le débat sur le concept de résilience et ont facilité la compréhension et la localisation des composantes faisant varier les niveaux de résilience.

Enfin, les ateliers et la confrontation entre acteurs, gestionnaires mais aussi universitaires avignonnais et canadiens a entraîné un échange local mais aussi une comparaison internationale. Le fait de présenter deux approches, méthodologies et conceptions de résilience a permis d'instruire, échanger et débattre sur ce concept. Les résultats de ces échanges et ateliers de travail sont la collaboration à moyen terme entre universitaires et acteurs locaux. En effet, au-delà de ces ateliers, le directeur de l'aménagement et de la mobilité de la Ville d'Avignon a sollicité l'expertise de ce travail pour favoriser un aménagement résilient autour des projets du Pôle Paysages Urbains. Cette demande souligne un besoin pour la Ville d'Avignon de se renouveler et de moderniser et professionnaliser ses approches et outils de gestion des risques. Le travail et les apports de cette recherche dépassent donc la durée exacte de la thèse et perdurent dans le temps pour accompagner la Ville dans un processus de (ré)aménagement résilient.

2.4. Limites opérationnelles

2.4.1. Limites du choix des données et des outils de traitements

L'utilisation de l'open data a tout d'abord contraint le choix des indicateurs, sous-indicateurs et variables. En effet, certaines données étaient en trop faible qualité ou pour certaines inexistantes. Concernant l'indicateur de résilience technique, les données sont à 100% des données sensibles, obtenues grâce au partenariat avec le service technique de la collectivité d'Avignon. La généricité de la démarche est donc fonctionnelle à 90%, mais un partenariat est nécessaire pour les 10% restant. Cette limite est néanmoins un atout pour la démarche participative et collaborative et a permis un échange étroit avec les services urbains. Pour autant

la question de la reproductibilité demeure en suspens. La nécessité de ces données dans l'approche de résilience peut également être interrogée. Ces variables sont-elles nécessaires ou peuvent-elles être acquises par une approche en libre accès ? L'utilisation d'*open street map* s'est dès lors posée. Outil cartographique, l'objectif de ce projet est de constituer une base de données géoréferrencées mondiales en utilisant le système GPS, des données en libre accès mais aussi des données créées par les utilisateurs. Impliquer l'utilisateur à l'aune même de la création de donnée peut-être une perspective intéressante pour développer une culture de résilience à chaque échelon.

Cette limite concernant l'open data se retrouve également dans l'utilisation d'outils en open source. Cette démarche a pu s'effectuer à 50% en utilisant l'outil QGIS pour le processus de cartographie mais aussi l'outil de cartographie gratuite UMAP d'*open street map* pour la valorisation des résultats dans une démarche d'accessibilité des travaux. Cependant, l'outil de traitement et de construction des scripts informatiques est l'outil FME (*Feature Manipulation Engine*). Cet outil est un ETL (*Extract, Transform, Load*), un outil d'Extraction, de Transformation et de Chargement de données géographiques vectorielles et d'images. Cet outil permet de charger des fichiers de formats très différents et est spécialement conçu pour être utilisé avec des systèmes d'information géographiques (SIG), la conception assistée par ordinateur et les logiciels rasters graphiques. FME est utile dans les applications de cartographie géographique, géologique et topographique interactive, telles que Google Earth et MapQuest. Il facilite la transformation des données spatiales en une variété de formats, de modèles de données et de référentiels pour la transmission aux utilisateurs finaux. Pourtant, malgré la grande richesse d'utilisation de cet outil, il est toujours payant à l'heure actuelle. Il est néanmoins utilisé à large échelle dans les collectivités, industries, services de production de données etc. Néanmoins à l'heure actuelle la démarche n'est pas à 100% en open source.

2.4.2. Quelle échelle d'analyse pour favoriser l'aide à la décision et entraîner l'action ?

La question de l'échelle est également à débattre. Ayant fait le choix d'utiliser de l'open data et les données nationales de l'INSEE, plusieurs options étaient possibles quant à l'échelle. Souhaitant valoriser l'échelle locale afin de s'assurer que les résultats soient suivis par une prise de décision, les deux échelles intéressantes étaient le carroyage 200m x 200m ou l'échelles des IRIS. Après plusieurs tests, le constat a été fait que le carroyage n'avait pas de données d'assez bonne qualité pour chaque variable utilisée. L'échelle des IRIS a donc été retenue. Pourtant, dans l'optique d'un outil d'aide à la décision et afin d'analyser l'impact des projets urbains par la suite pourrait être intéressant dans une démarche d'amélioration de la méthode. En outre, utiliser les données de l'INSEE nécessite d'attendre les mises à jour de toutes les données qui ont lieu environ tous les 3 ans. Une réactualisation est donc nécessaire au minima tous les trois ans.

En outre, jouer sur les échelles pourraient contextualiser le territoire urbain au sein du département ou de la région. A l'heure actuelle cette analyse peut se faire à l'échelle de la région Sud Provence-Alpes Côte d'Azur (Figure 84) et à l'échelle de la France mais uniquement pour l'indicateur de résilience sociale.

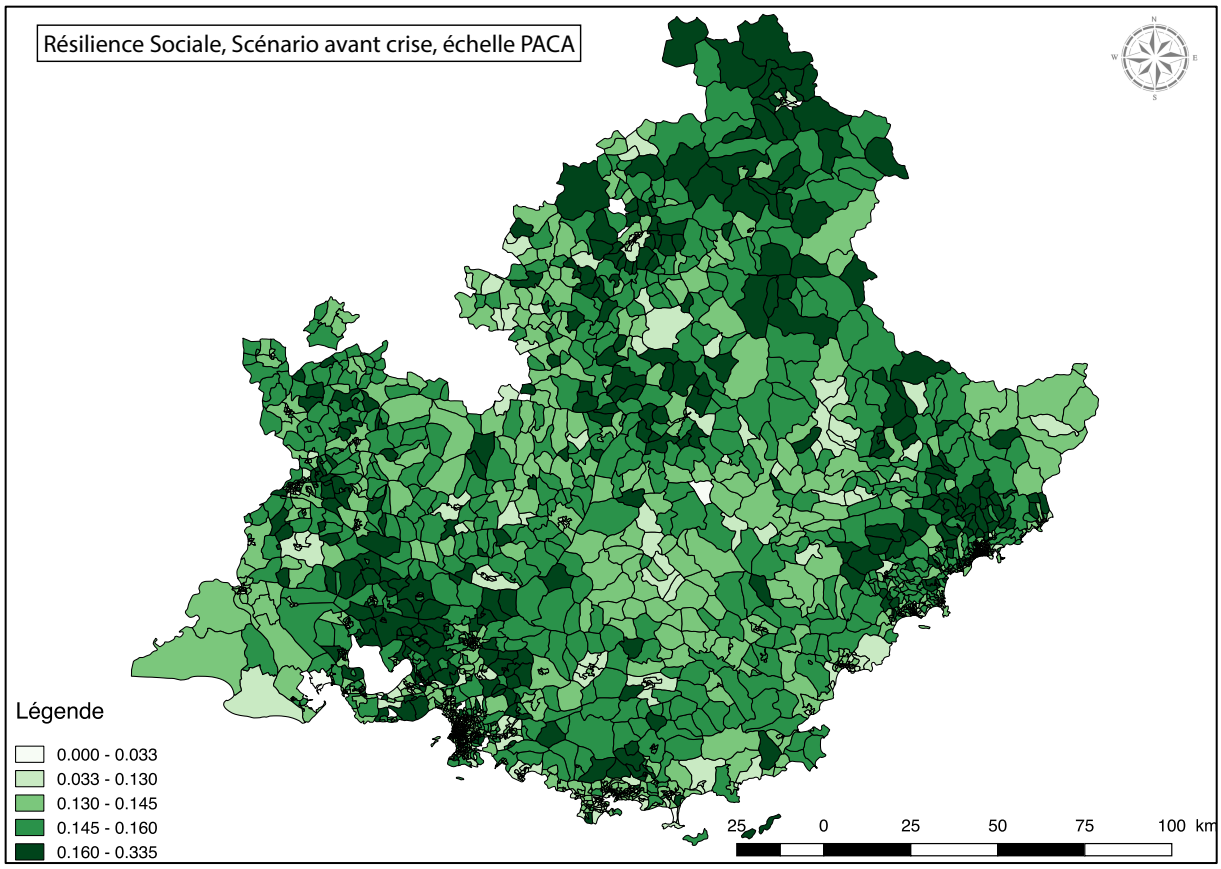

Figure 84 : Résilience sociale, scénario avant crise, échelle PACA

2.4.3. Choix des traitements de l'indicateur de résilience sociale

Concernant l'indicateur de résilience sociale, une amélioration notable est à envisager et qui pourrait s'effectuer avec une approche à plus long terme afin de nuancer et améliorer la démarche. A l'heure actuelle, les ratios sont calculés selon deux approches (Figure 85 et Figure 86). L'une, calcule le poids de la variable en fonction du nombre total d'habitants par IRIS (exemple : nombre de chômeurs sur le nombre total d'habitants de l'IRIS). Cette technique convenait à 90% et était efficace essentiellement sur les IRIS les plus peuplés. Cependant la question s'est posée sur les IRIS les moins fréquentés. Un test a donc été fait pour calculer le ratio sur le nombre d'habitations et non plus d'habitants (exemple : nombre de chômeurs sur le nombre total d'habitations de l'IRIS).

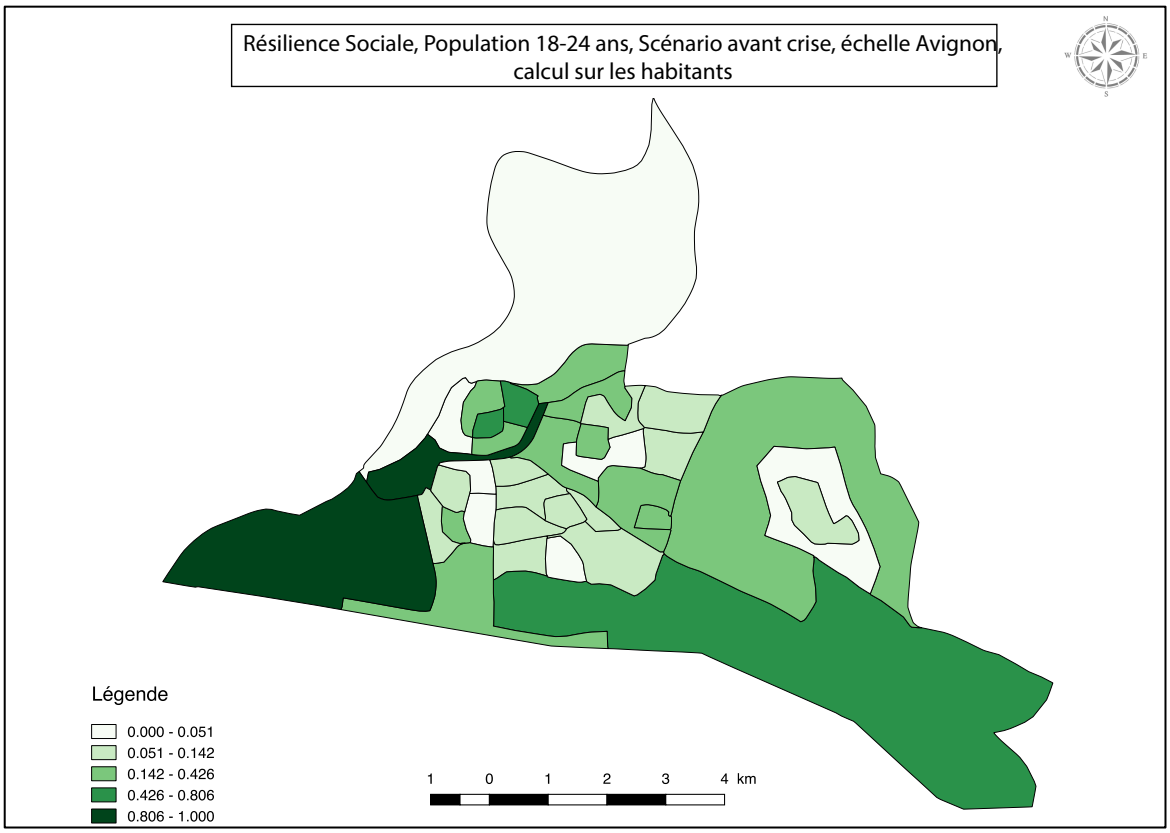

Figure 85 : Représentation de la population 18-24 ans à l'échelle d'Avignon selon un calcul sur la population total de l'IRIS, scénario avant crise

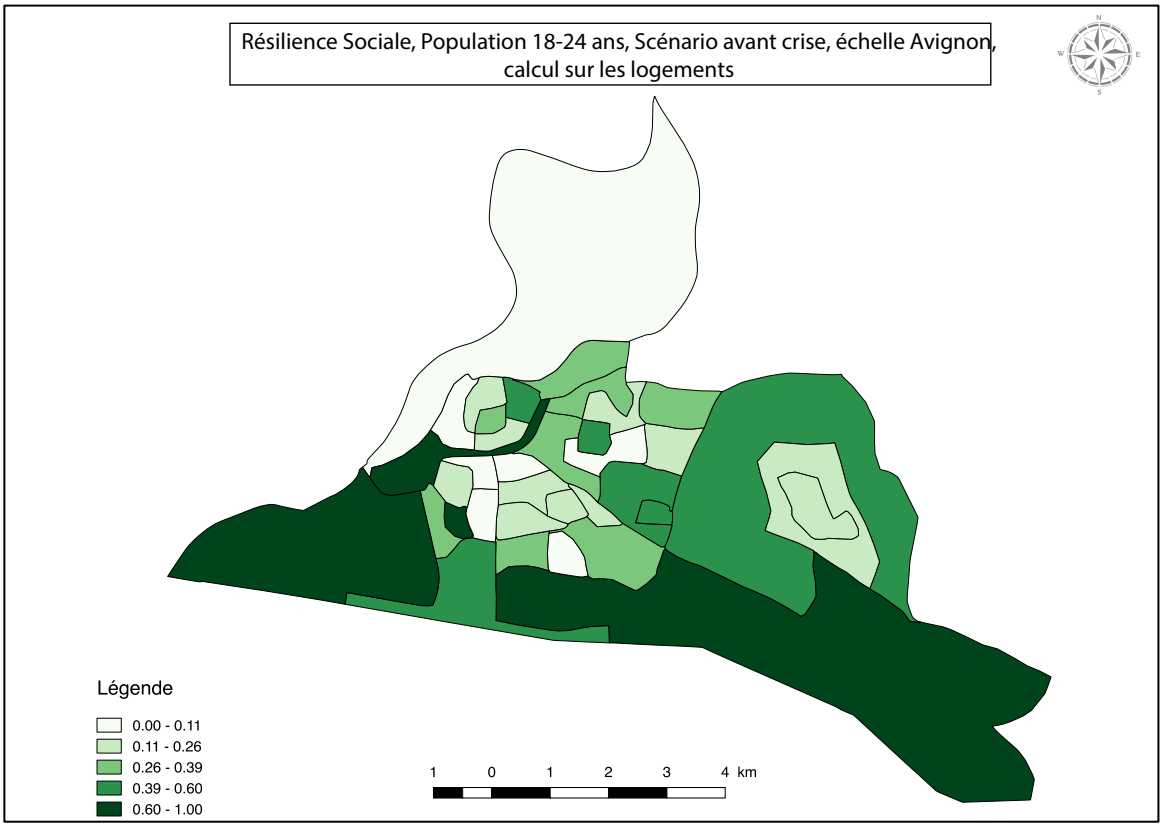

Figure 86 : Représentation de la population 18-24 ans à l'échelle d'Avignon selon un calcul sur les logements de l'IRIS, scénario avant crise

Ces résultats varient notamment pour les IRIS les plus faiblement peuplés et pour ceux-ci, le calcul selon les logements semble correspondre davantage à la réalité territoriale, à l'inverse des IRIS comprenant le plus d'habitants. C'est donc la limite la plus importante de ce travail, à savoir que ces indicateurs sont avant tout un outil de discussion, de clarification et de réflexion autour du concept de résilience qu'une représentation efficace à 100% de la réalité spatiale et sociale. A l'heure actuelle, il n'y a pas encore suffisamment de perspective et de validation empirique dans l'analyse de la résilience sur une longue période de temps et comme un continuum. Cette étude est donc davantage utile pour définir, analyser, mettre en perspective les potentialités de résilience et de vulnérabilité afin d'inciter une investigation et une modélisation plus poussée dans les communautés scientifiques qu'un outil final pour les gestionnaires urbains. Cette étude a davantage pour vocation d'évoluer avec les acteurs que de fournir des réponses figées et définitives sur le territoire et la résilience. Mais n'est-ce pas plus intéressant et pertinent de fournir des pistes de réflexion à améliorer avec l'avancée des connaissances et des pratiques dans un espace urbain mouvant et incertain que de produire des approches avec des partis pris qui seraient rapidement obsolètes au vu de l'évolution rapide du visage urbain et des catastrophes ?

2.4.4. Évaluer l'impact des nouveaux projets urbains

Outre le test sur un événement précis, l'analyse de l'impact des nouveaux projets urbains n'a pas pu être menée à bien. Une des ambitions du projet était de quantifier l'impact des projets urbains sur la valeur de la résilience, tant à l'échelle des IRIS qu'à l'échelle de la collectivité. Pourtant un des projets les plus notable sur le territoire Avignonnais – le quartier Avignon Courtine Confluence situé en zone inondable autour de la gare TGV- n'a pas été assez abouti par les aménageurs et architectes. Les documents d'information sont trop généraux et ne décrivent que l'objectif final – un quartier résilient aux inondations – mais sans expliciter les moyens et les critères de définition et d'opérationnalisation du concept. Ce projet n'a donc pas pu aboutir et devrait être analysé dans les années à venir.

> ***Ce travail est confronté à plusieurs limites. Ces limites sont liées tant aux outils choisis, qu'aux données ou encore à l'approche. Néanmoins ce travail permet d'enclencher des réflexions sur le concept et sa difficile opérationnalisation, une réflexion qui est menée conjointement avec les acteurs et décideurs locaux. En outre, malgré plusieurs limites, des pistes de réflexion ont d'ores et déjà vu le jour pour y répondre.***

2.5. Perspectives opérationnelles

Face à ces limites opérationnelles, plusieurs perspectives ont été envisagées afin d'améliorer la méthodologie et son intégration dans les stratégies de gestion des risques (Figure 87).

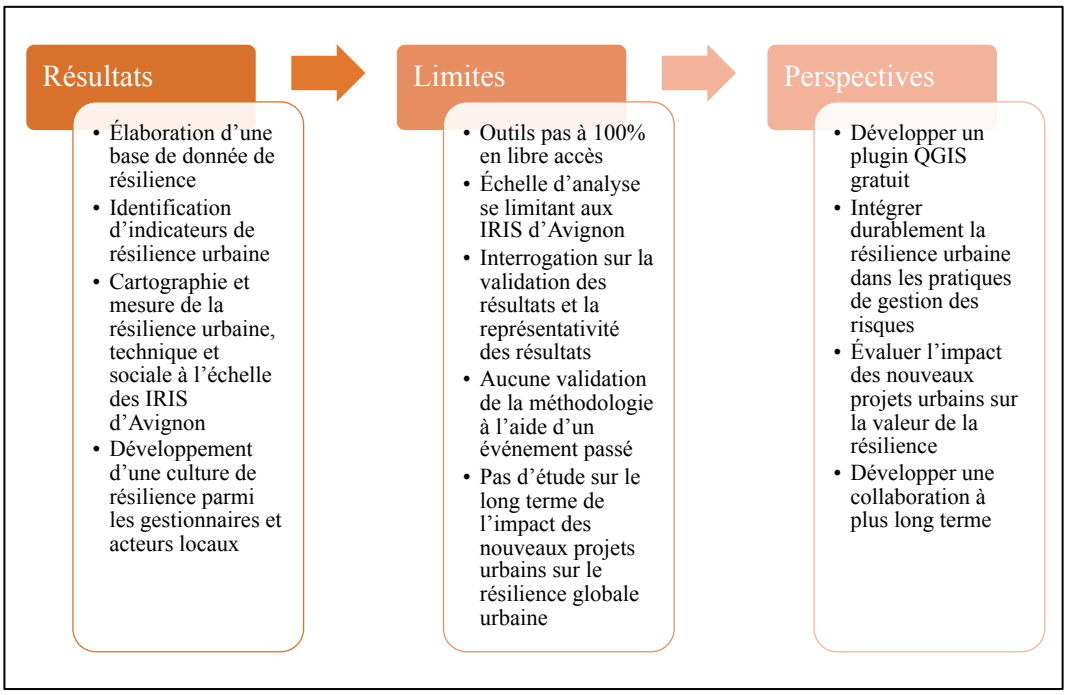

Figure 87 : Perspectives opérationnelles

2.5.1. Amélioration des outils

Afin de diversifier l'approche et la rendre davantage accessible, la question de l'utilisation d'un outil payant s'est longtemps posée. Une des perspectives d'amélioration serait de créer un plugin QGIS. L'avantage d'un plugin est qu'il permettrait de créer le script informatique directement via QGIS. Créer une extension sur ce logiciel rendrait la démarche autonome et accessible à tous. Dès lors le plugin ne serait plus simplement utilisé par les gestionnaires, mais aussi par la population civile, ce logiciel étant facilement accessible et utilisable. En outre, QGIS propose aux adhérents de suggérer des améliorations des plugins, cela permettrait donc à la communauté scientifique et informatique d'améliorer constamment le plugin, son utilisation et les résultats.

2.5.2. Amorcer une gestion des risques plus résiliente

Cette méthodologie a construit une nouvelle clef de lecture pour analyser la résilience urbaine. Pourtant, la méthodologie n'a pas encore permis la conception de stratégies de gestion des risques résilientes. Cette méthodologie devrait entraîner la réévaluation des stratégies préexistantes et la conception de nouvelles approches de résilience. Cette évolution devrait s'établir à plusieurs niveaux. Tout d'abord, l'intégration d'un indicateur de gouvernance

permettrait d'évaluer les décisions et prises de positions politiques et administratives des gouvernances locales. Cet indicateur serait un bon moyen pour identifier les objectifs politiques, sans lesquels la conception de stratégies de gestion des risques résilientes serait impossible. La présentation des résultats pourrait également jouer un rôle sur la prise de conscience de la réalité territoriale et donc entraîner une action. Afin d'améliorer la méthodologie et de convenir davantage aux pratiques des aménageurs, une réflexion a été menée sur la manière de valoriser les résultats. Au début du travail de recherche, un constat avait été fait que les cartes représentant individuellement indicateurs et sous-indicateurs étaient plus pertinentes et enseignaient davantage sur la réalité spatiale et sociale. Or après réflexion et cas d'étude, une première approche passant par une cartographie de la résilience globale puis, seulement par la suite, par les cartes représentant les indicateurs, pourrait alerter davantage sur la résilience territoriale. Suivant cette idée, des cartes de résilience globale ont été réalisées, en agrégeant chaque sous-indices et indicateurs, agrégation réalisée deux fois, pour le calcul sur les habitants (Figure 88) ou les logements (Figure 89) des IRIS (concernant uniquement l'indicateur de résilience sociale).

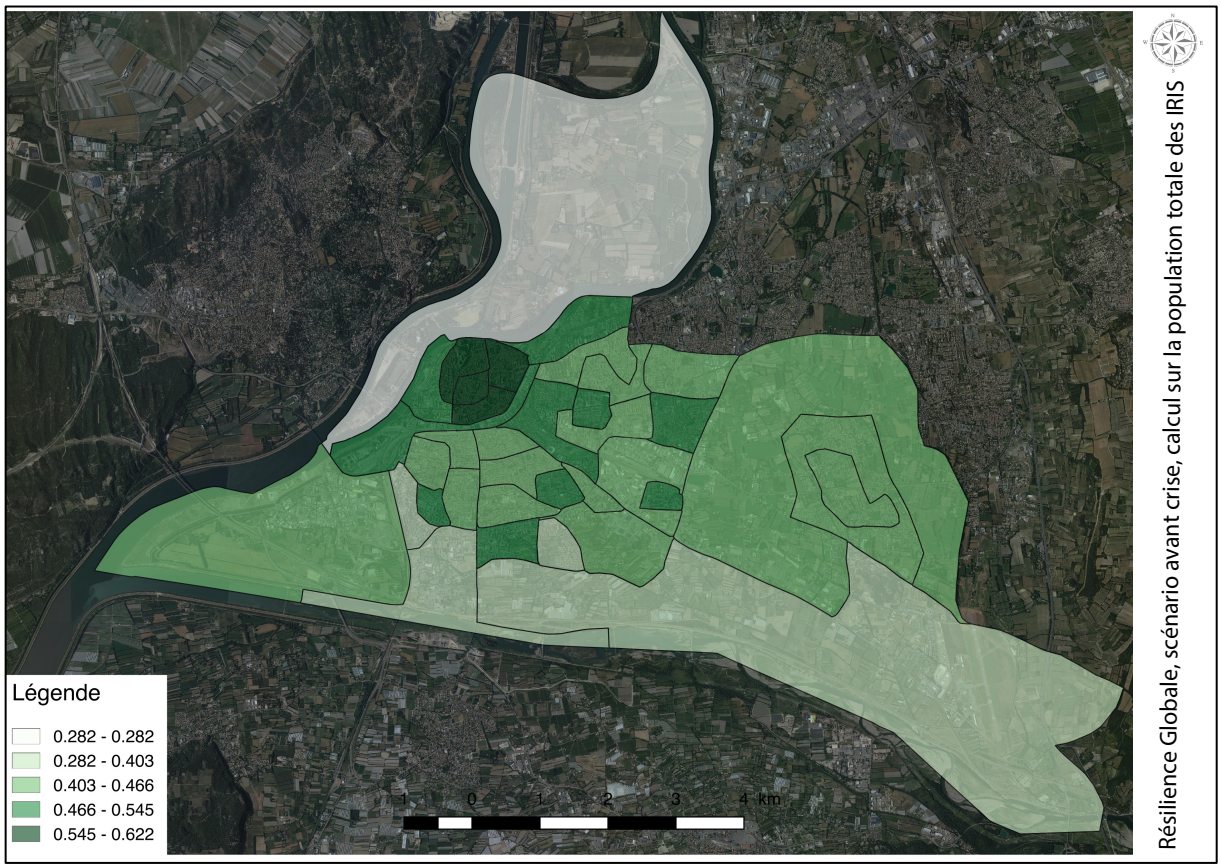

Figure 88 : Résilience globale, scénario avant crise, calcul sur la population des IRIS

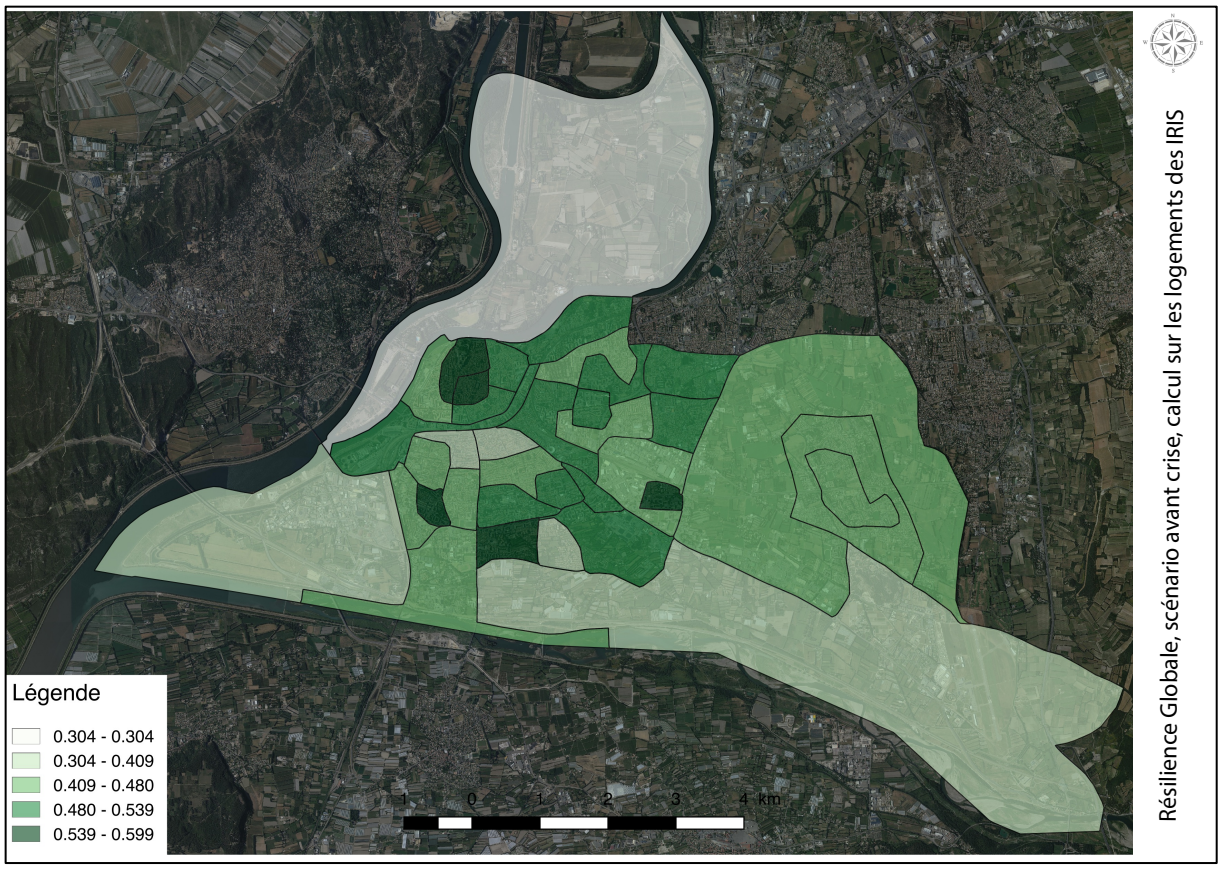

Figure 89 : Résilience globale, scénario avant crise, calcul sur les logements des IRIS

2.5.3. Évaluer la résilience d'autres territoires

Une autre perspective serait d'évaluer la résilience de d'autres territoires et à d'autres échelles. L'approche pourrait être testée sur d'autres territoires nationaux (autre ville) et à d'autres échelles (Régionale, départementale, nationale). Il pourrait être instructif d'élargir la méthodologie en intégrant des cas d'étude à l'étranger ce qui permettrait de questionner l'origine et le choix des données nécessaires lors de ce changement d'échelles.

2.5.4. Évaluer l'impact des nouveaux projets urbains sur la résilience

Comme évoqué précédemment, un des objectifs de cette recherche était d'évaluer l'impact des nouveaux projets urbains sur la valeur de la résilience des IRIS mais aussi de la résilience globale de la Ville. Or, du fait d'un manque de données, cette analyse n'a pas pu avoir lieu. Il serait donc intéressant de développer cette idée et de tester l'approche sur des quartiers déjà construits et définis comme résilients. Certains quartiers résilients ont été présentés dans la *Partie 1 État de l'art : Méthodes et outils pour évaluer, modéliser et opérationnaliser la résilience*. Il serait judicieux de faire une étude avant-après la construction de ces quartiers afin de quantifier l'évolution de la résilience, à l'échelle locale du quartier et à l'échelle urbaine de la ville.

2.5.5. Développer une collaboration sur le long terme

Des réflexions à plus long terme doivent être menées. Tout d'abord, comme abordé dans l'article 4 de la *Partie 3 Résultats*, un travail a été élaboré pour comparer deux approches de résilience et les confronter autour d'ateliers avec les gestionnaires des risques locaux. Cependant, malgré les avancées notables de ce travail commun entre les équipes françaises et canadiennes, les résultats étaient mitigés. Cela s'est expliqué par la connaissance des outils de définition et modélisation de la résilience dans la sphère scientifique, mais encore très peu chez les aménageurs et décideurs locaux. La conclusion de cette recherche a été la nécessité réelle de créer des partenariats sur le long terme, au-delà d'un projet spécifique de recherche. En effet, la prise de conscience des limites qui persistent encore aujourd'hui doit permettre aux collectivités d'approfondir leur compréhension des enjeux de l'intégration du concept de résilience dans leurs pratiques urbaines. Ils pourront ainsi faire face aux incertitudes climatiques et aborder certains des problèmes observés au cours de ces échanges. Par conséquent, les outils d'aide à la décision élaborés doivent créer servir de sujets d'échanges entre gestionnaires et chercheurs et entraîner débats et améliorations. C'est dans cette optique qu'une volonté de créer des réunions de travail *a minima* tous les deux ans pour évaluer l'utilisation, les limites, les améliorations nécessaires, les prises de conscience liées à cet outil d'aide à la décision. Cette démarche permettra de garder cette recherche dynamique et mouvante, en adéquation avec le concept et la thématique qui y sont liés.

> ***Ce travail de recherche offre plusieurs perspectives pour de futurs projets. Que ce soit des perspectives à court ou à long terme, ce travail doit permettre de faire se rencontrer gestionnaires, acteurs et décisionnaires locaux avec les experts de la résilience. Les perspectives suggérées doivent servir à créer un savoir commun autour de la résilience, tant pour s'assurer que les acteurs locaux soient alertés et prêts à faire face aux risques croissants, que pour les citoyens afin de développer une responsabilité individuelle et collective face aux stratégies de gestion des risques et à l'implantation de la résilience à l'échelle urbaine et sociale. Les différentes formes d'améliorations, que ce soit au niveau des approches, des outils ou des données, doivent servir à clarifier le concept et l'intégrer aux divers échelons de la gestion des risques.***

Conclusion

« The one thing we need more than hope is action.
Once we start to act, hope is everywhere.
So instead of looking for hope, look for action.
Then, and only then, hope will come. »
(Thunberg and Vasseur, 2019)

Le contexte de dérèglement climatique, d'augmentation des inondations en milieu urbain et d'augmentation de la population urbaine a conduit à un questionnement des pratiques de gestion des risques. Parmi les nouvelles approches, le concept de résilience offre un cadre d'actions riche et flexible afin d'encourager l'adaptation des territoires à l'augmentation des risques. Pourtant, ce concept est encore aujourd'hui trop peu opérationnalisé.

La démarche proposée a tenté de pallier aux limites théoriques et opérationnelles de la résilience urbaine en proposant une méthodologie permettant de construire un système spatial d'aide à la décision.

Les apports du système spatial d'aide à la décision ont permis d'évaluer, de modéliser et de débattre du concept de résilience.

Les premiers résultats ont permis de construire des indicateurs d'évaluation de la résilience afin d'identifier les composantes territoriales et sociales qui permettraient l'implémentation de la résilience. Comme identifié précédemment, le manque d'opérationnalisation de la résilience tient essentiellement à son aspect abstrait. La résilience urbaine peut définir les aptitudes des populations, territoires et infrastructures à mettre en place des ressources et compétences avant, pendant et après un choc, afin de vivre au mieux un événement perturbateur de façon à en limiter les impacts négatifs. Les capacités peuvent être à la fois matérielles (réseaux urbains, infrastructures critiques, bâti, etc.) et immatérielles (connaissances du risque, dynamiques économiques, etc.) et pourraient se révéler via l'élément perturbateur. Identifier et mesurer les éléments clefs, urbains techniques et sociaux, a permis de clarifier le concept. La conception de ces indicateurs permet de fournir des objectifs d'action pour les acteurs locaux afin de travailler sur les composantes à faible résilience.

La conception du système spatial d'aide à la décision à travers des outils de visualisation a également accompagné le débat, la clarification, la visualisation et la compréhension du concept. Les indicateurs de résilience sont dès lors spatialisés à l'échelle urbaine locale afin de géo-localiser les éléments vulnérables et/ou résilients. La représentation spatiale permet de localiser précisément les infrastructures critiques et de quantifier leur résilience en fonction de leur aire d'action ce qui tend à répondre aux enjeux et incertitudes face à la vulnérabilité urbaine.

Enfin, l'approche collaborative a permis de partager des connaissances scientifiques et pratiques, de communiquer sur les risques et la résilience et de co-concevoir ce système spatial d'aide à la décision. La collaboration a répondu aux limites d'appropriation et de

compréhension du concept dans l'optique d'entraîner la prise de décision et le passage à l'action.

Les perspectives académique et opérationnelles de ce travail s'établissent à plus ou moins long terme. Sur le plan académique, une ouverture vers d'autres risques et aléas permettrait de répondre aux enjeux de l'augmentation des catastrophes en milieu urbain et des incertitudes qui y sont liées. L'intégration d'un indicateur de gouvernance permettrait d'élargir l'approche et l'analyse. Cet indicateur faciliterait l'analyse des nouveaux projets urbains et répondrait en partie aux enjeux de l'urbanisation croissante.

Concernant l'aspect opérationnel, une conception d'un plugin informatique permettrait de diffuser plus largement l'analyse de résilience et participerait à l'étude de d'autres territoires. Dans un second temps, une réflexion sur le long terme doit être menée. Tout d'abord élaborer un suivi régulier de l'utilisation de l'outil doit être effectué, avec un retour tous les deux ans minimums afin d'améliorer l'analyse, la compréhension, l'utilisation et l'adoption de l'outil par les acteurs locaux. Cette démarche permettra de dynamiser la méthodologie élaborée au cours de cette thèse afin qu'elle puisse évoluer avec les avancées théoriques et opérationnels du concept de résilience.

Enfin, une réflexion portée sur la forme de l'outil en lui-même et sa portée actuelle et future doit émerger. C'est ainsi que l'idée de construire un Observatoire de Résilience s'est imposée. L'observatoire serait un outil qui permettrait de concevoir un cadre pour répondre aux besoins en termes d'avancées scientifiques, techniques, sociales et territoriales sur la question des risques et de la résilience.

Bibliographie

A

Abshirini, E., Koch D., et Legeby A. « Flood Resilient Cities: A Syntactic and Metric Novel on Measuring the Resilience of Cities against Flooding, Gothenburg, Sweden ». *Journal of Geographic Information System* 9, nº 5 (2017): 505-34. https://doi.org/10.4236/jgis.2017.95032.

Adger, W. N., Brooks N., Bentham G., Agnew M., et Eriksen S. *New indicators of vulnerability and adaptive capacity*. Vol. 122. Tyndall Centre for Climate Change Research Norwich, 2004. http://www.tyndall.ac.uk/sites/default/files/Adger%20W.%20N%20.,%20Brooks,%20N.%20,%20Kelly,%20M.,%20Bentham,%20S.%20and%20Eriksen,%20S.%20(2004)%20New%20indicators%20of%20vulnerability%20and%20adaptive%20capacity%20(tr7).pdf.

Adger, W. N., et Brooks N. « Does global environmental change cause vulnerability to disaster? » In *Natural Disaster and Development in a Globalizing World*, Routledge., 24. London, 2003.

Ahern, J. « From Fail-Safe to Safe-to-Fail: Sustainability and Resilience in the New Urban World ». *Landscape and Urban Planning* 100, nº 4 (2011): 341-43. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.02.021.

Albouy, F-X. *Le temps des catastrophes*. Paris: Descartes, 2002.

Andrienko, G., Andrienko N., Jankowski P., Keim D., Kraak M.-J., MacEachren A., et Wrobel S. « Geovisual Analytics for Spatial Decision Support: Setting the Research Agenda ». *International Journal of Geographical Information Science* 21, nº 8 (2007): 839-57. https://doi.org/10.1080/13658810701349011.

B

Bahadur, A.V., Ibrahim M., et Tanner T. « The resilience renaissance? Unpacking of resilience for tackling climate change and disasters », 2010, 45.

Bahadur, A., Wilkinson E., et Tanner T. « Measuring Resilience: An Analytical Review (Draft under Review) ». Unpublished, 2015. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1300.1444.

Bakkensen, L.A., Fox-Lent C., Read L.K., et Linkov I. « Validating Resilience and Vulnerability Indices in the Context of Natural Disasters: Validating Resilience and Vulnerability Indices ». *Risk Analysis* 37, nº 5 (2017): 982-1004. https://doi.org/10.1111/risa.12677

Balsells, M, Becue V., Barroca B., Diab Y., et Serre D. « Flood resilience assessment of New Orleans neighborhood over time ». In *Resilience and Urban Risk Management*. CRC Press, 2013. https://doi.org/10.1201/b12994-17.

Balsells, M. « Contribution de la conception d'un quartier à la résilience urbaine face au risque d'inondation à l'échelle du quartier ». Université de Mons-Faculté d'Architecture et d'Urbanisme, 2015.

Barredo, J. I. « Normalised Flood Losses in Europe: 1970–2006 ». *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9, nº 1 (2009): 97-104. https://doi.org/10.5194/nhess-9-97-2009.

Barroca, B. « Résilience Urbaine: Une venelle entre impasse et avenu(e). Habilitation à Diriger les Recherches. Volume 2 ». Université Paris-Est, 2018.

Barroca, B., DiNardo M., et Mboumoua I. « De la vulnérabilité à la résilience : mutation ou bouleversement ? » *EchoGéo*, nº 24 (2013). https://doi.org/10.4000/echogeo.13439.

Barroca, B., Serre D., et Youssef D. « Le concept de résilience à l'épreuve du génie urbain ». *[VertigO] La revue électronique en sciences de l'environnement* 12, nº 2 (2012). http://id.erudit.org/iderudit/1022538ar.

Beaud, M. *Le basculement du monde: de la terre, des hommes et du capitalisme*. Poche essais. Paris: La Découverte, 2000.

Becerra, S. « Vulnérabilité, risques et environnement : l'itinéraire chaotique d'un paradigme sociologique contemporain ». *VertigO*, nº Volume 12 Numéro 1 (2012). https://doi.org/10.4000/vertigo.11988.

Benson, C. « Macro-economic concepts of vulnerability: dynamics, complexity and public policy ». In *Mapping Vulnerability. Disasters, Development and People*, Routledge. Routledge, 2004.

Bercerra, S., et Peltier A., éd. *Risques et environnement, recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés*. Sociologies et environnement. Paris: L'Harmattan, 2009.

Bertacchini, Y. « Intelligence territoriale: une lecture retro-prospective ». *Revue internationale d'intelligence économique* 2 (2010): 65-97.

Birkmann, J. « Indicators and Criteria for Measuring Vulnerability: Theorical Bases and Requirements ». In *Measuring Vulnerability to Natural Hazards: Towards Disaster Resilient Societies*. Tokyo: UNU-Press, 2006.

Bishop, I.D, Pettit C.J, Sheth F., et Sharma S. « Evaluation of Data Visualisation Options for Land-Use Policy and Decision Making in Response to Climate Change ». *Environment and Planning B: Planning and Design* 40, nº 2 (2013): 213-33. https://doi.org/10.1068/b38159.

Blöschl, G., Hall J., Parajka J., Perdigão Rui A. P., Merz B., Arheimer B., Aronica G.T., et al. « Changing Climate Shifts Timing of European Floods ». *Science* 357, nº 6351 (2017): 588-90. https://doi.org/10.1126/science.aan2506.

Bodin, Ö., Crona B., et Ernstson H. « Social Networks in Natural Resource Management: What is there to learn from a structural perspective? », Ecology and Society, 11, nº 2 (2006): 8.

Boin, A., et McConnell A. « Preparing for critical infrastructure breakdowns: the limits of crisis management and the need for resilience ». *Journal of Contingencies and Crisis Management* 15, nº 1 (2007): 50–59.

Boito, C. *Conserver ou restaurer: les dilemmes du patrimoine*. Tranches de ville. Besançon: Les éditions de l'imprimeur, 2000.

Bonnefous, C. *Indicateurs de performance*. Relié. Ic2 productique. Paris: Hermès Science Publ., 2001.

Booth, J.W., et Neill J.T. « Coping Strategies and the Development of Psychological Resilience ». *Journal of Outdoor and Environmental Education* 20, nº 1 (2017): 47-54. https://doi.org/10.1007/BF03401002.

Bourgeois, P., Dupin F., Galibert T., Ridao J-P., et Verlhac E. « Evaluation du plan de prévention des submersions rapides dans les Outre-Mer ». Ministère de l'intérieur, novembre 2015. https://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/164000135/index.shtml.

Bouchon, S. « L'application du concept de vulnérabilité aux infrastructures critiques: quelles implications pour la gestion territoriale des risques? » In *Annales des Mines-Responsabilité & Environnement*, 43:35–41, 2006. http://annales.org/re/2006/re43/Bouchon.pdf.

Bouwer, L. M., Bubeck P., et Aerts J. « Changes in Future Flood Risk due to Climate and Development in a Dutch Polder Area ». *Global Environmental Change* 20, nº 3 (2010): 463-71. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.04.002.

Brand, F.S., Jax, K., 2007. Focusing the Meaning(s) of Resilience: Resilience as a Descriptive Concept and a Boundary Object. Ecology and Society 12.

Bretagnolle, A., Daudé E., et Pumain D. « From theory to modelling: urban systems as complex systems ». *Cybergeo*, 2006. https://doi.org/10.4000/cybergeo.2420.

Britton, N.R., et Clark G.J. « From Response to Resilience: Emergency Management Reform in New Zealand ». *Natural Hazards Review* 1, nº 3 (2000): 145-50. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2000)1:3(145).

Burton, I., Kates R.W., et White G.F. *The environment as hazard*. 2nd ed. New York: Guilford Press, 1993.

C

Callon, M., Lascoumes P., et Barthe Y. *Agir dans un monde incertain: essai sur la démocratie technique*. La couleur des idées. Paris: Editions du Seuil, 2001.

Campanella, T.J. « Urban Resilience and the Recovery of New Orleans ». *Journal of the American Planning Association* 72, nº 2 (2006): 141-46. https://doi.org/10.1080/01944360608976734.

Cardona, O.D., et Carreño M.L. « Updating the Indicators of Disaster Risk and Risk Management for the Americas ». *Journal of Integrated Disaster Risk Management* 1, nº 1 (2011): 27-47. https://doi.org/10.5595/idrim.2011.0014.

Cardona, O. « The Need for Rethinking the Concepts of Vulnerability and Risk from a Holistic Perspective: A Necessary Review and Criticism for Effective Risk Management1 ». *Mapping vulnerability. Disasters, development and people*, 2004.

Cardona, O.D. *Indicators of Disaster Risk and Risk Management.* Washington, D.C.: Inter-American Development Bank., 2007.

Cardona, O.D., Van Aalst M.K., Birkmann J., Fordham M., McGregor G., Perez R., Pulwarty R.S., et al. « Determinants of Risk: Exposure and Vulnerability ». In *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, édité par Christopher B. Field, Vicente Barros, Thomas F. Stocker, et Qin Dahe, 65-108. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245.005.

Carladous, S., Tacnet J-M., Batton-Hubert M., Dezert J., et Marco O. « Managing Protection in Torrential Mountain Watersheds: A New Conceptual Integrated Decision-Aiding Framework ». *Land Use Policy* 80 (2019): 464-79. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.10.040.

Carpenter, S., Walker B., Anderies J.M., et Abel N. « From Metaphor to Measurement: Resilience of What to What? » *Ecosystems* 4, nº 8 (2001): 765-81. https://doi.org/10.1007/s10021-001-0045-9.

Catastrophes Naturelles-Observatoire permanent des catastrophes naturelles et des risques naturels. « Bilan statistique des catastrophes naturelles survenues dans le Monde entre 2002-2015 », 2016. https://www.catnat.net/donneesstats/dernieres-actualites/21507-bilan-statistique-des-catastrophes-naturelles-survenues-dans-le-monde-entre-2001-2015-2.

Cauvin, C., Escobar F., et Serradj A. *Cartographie thématique*. Paris: Hermès Science publications : Lavoisier, 2007.

Chelleri, L. « From the «Resilient City» to Urban Resilience. A review essay on understanding and integrating the resilience perspective for urban systems ». *Documents d'Anàlisi Geogràfica* 58, nº 2 (2012): 287. https://doi.org/10.5565/rev/dag.175.

Chrislip, D.D. *The collaborative leadership fieldbook: a guide for citizens and civic leaders*. The Jossey-Bass nonprofit and public management series. San Francisco: Jossey-Bass, 2002.

Claudel, P. « L'élasticité américaine ». In *Oeuvres en prose*, Gallimard., p.1204. Bibliothèque de la Pléiade, 1965.

Çöltekin, A., Bleisch S., Andrienko G., et Dykes J. « Persistent Challenges in Geovisualization – a Community Perspective ». *International Journal of Cartography* 3, nº sup1 (2017): 115-39. https://doi.org/10.1080/23729333.2017.1302910.

Constas, M.A., Frankenberger T.R., et Hoddinott J. « Resilience measurement principles toward an agenda for measurement design ». FAO, WFP, 2010. https://www.fsnnetwork.org/resilience-measurement-principles-toward-agenda-measurement-design.

Coté, M-J., Poulin G., Prévil C., Saint-Onge B., et Waaub J-P. « Un système intégré d'aide à la décision pour gérer le territoire en tenant compte des dimensions environnementale et participative du développement durable. Le cas du SIAD Outaouais, Québec, Canada / An integrated system of computer assisted decision-making for spatial participative management. The case of the Outaouais region of Quebec ». *Géocarrefour* 76, nº 3 (2001): 253-64. https://doi.org/10.3406/geoca.2001.2563.

Cotelle, P. « Une géographie de l'insécurité urbaine post catastrophe: le cas de la Nouvelle-Orléans et du cyclone Katrina (USA, 2000-2010) ». Université de Montpellier 3, 2014.

Cramer, W. , Guiot J., Fader M., Garrabou J., Gattuso J-P., Iglesias A., Lange M.A., et al. « Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean ». *Nature Climate Change* 8, nº 11 (2018): 972-80. https://doi.org/10.1038/s41558-018-0299-2.

Cred Crunch. « Disasters 2018: Year in Review », 2019.

Cutter, S.L. « The Landscape of Disaster Resilience Indicators in the USA ». *Natural Hazards* 80, nº 2 (2016): 741-58. https://doi.org/10.1007/s11069-015-1993-2.

Cutter, S.L. *Environmental Risks and Hazards*. Illustrée. Prentice Hall, 1994.

Cutter, S.L., Ash K.D., et Emrich C.T. « The Geographies of Community Disaster Resilience ». *Global Environmental Change* 29 (2014): 65-77. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.08.005.

Cutter, S.L., Burton C.G., et Emrich C.T. « Disaster Resilience Indicators for Benchmarking Baseline Conditions ». *Journal of Homeland Security and Emergency Management* 7, nº 1 (2010). https://doi.org/10.2202/1547-7355.1732.

Cutter, S. L., et Finch C. « Temporal and Spatial Changes in Social Vulnerability to Natural Hazards ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105, nº 7 (2008): 2301-6. https://doi.org/10.1073/pnas.0710375105

Cutter, S.L., Barnes L., Berry M., Burton C., Evans E., Tate E., et Webb J. « A Place-Based Model for Understanding Community Resilience to Natural Disasters ». *Global Environmental Change* 18, nº 4 (2008): 598-606. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.07.013.

———. « Community and Regional Resilience: Perspectives from Hazards, Disasters, and Emergency Management ». Carri Research Report. Community and Regional Initiative, 2008.

Cutter, S.L., Boruff B.J., et Shirley W.L. « Social Vulnerability to Environmental Hazards* ». *Social Science Quarterly* 84, nº 2 (2003): 242-61. https://doi.org/10.1111/1540-6237.8402002.

Cyrulnik, B. *La Résilience ou comment renaître de sa souffrance?* Penser le monde de l'enfant. Fabert, 2004.

Cyrulnik, B., et Jorland G. *Résilience: connaissances de base*. Psychologie. Odile Jacob, 2012.

D

Daniel Lacombe, E. « L'inondation et la ville - la cité fluviale de Matra », s. d. https://www.edl-architecte.com/matra

Dauphiné, A, et Provitolo D.. « La résilience : un concept pour la gestion des risques ». *Annales de géographie* 654, nº 2 (2007): 115. https://doi.org/10.3917/ag.654.0115.

———. *Risques et catastrophes observer, spatialiser, comprendre, gérer*. Paris: A. Colin, 2013.

Davidson-Hunt, I.J., et Berkes F. « Nature and society through the lens of resilience: toward a human-in-ecosystem perspective ». In *Navigating Social–Ecological Systems*, édité par Fikret Berkes, Johan Colding, et Carl Folke, 53-82. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. https://doi.org/10.1017/CBO9780511541957.006.

De Courcy, R. « Les systèmes d'information en réadaptation ». *Réseau international CIDIH et facteurs environnementaux*, Réseau international CIDIH et facteurs environnementaux, 1-2, nº 5 (1992): 7-10.

De Graaf, R.E. « Flood-Proof Ecocities: Technology, Design and Governance ». In *Resilience and Urban Risk Management*, 39-47. CRC Press, 2013.

Densham, P.J. « Spatial decision support systems ». *Geographical information systems. Vol. 1: principles*, 1991, 403-12.

D'Ercole, R., Thouret J-C., Dollfus O., et Asté J-P. « Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés : concepts, typologie, modes d'analyse ». *Revue de géographie alpine* 82, nº 4 (1994): 87-96. https://doi.org/10.3406/rga.1994.3776.

Desconnets, J-C., Moyroud N., et Libourel T. « Méthodologie de mise en place d'observatoires virtuels via les métadonnées. » In *INFORSID*, 253–267, 2003. https://liris.cnrs.fr/inforsid/sites/default/files/a459c167Jfzn7dWi6.pdf.

Desthieux, G. « Approche systémique et participative du diagnostic urbain. Processus de représentation cognitive du système urbain en vue de l'élaboration d'indicateurs géographiques ». Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, 2005.

Djament-Tran, G., Le Blanc A., Lhomme S., Rufat S., et Reghezza-Zitt M. « Ce que la résilience n'est pas, ce qu'on veut lui faire dire », 2011. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00679293/.

Djament-Tran, G., et Reghezza-Zitt M.. *Résiliences urbaines: les villes face aux catastrophes*. Le Manuscrit. Recherche et Université. Paris, 2012.

Donolo, R.M. « Contributions to geovisualization for territorial intelligence ». Institut National des Sciences Appliquées de Lyon/ Universita degli studi di Roma tor Vergata, 2014.

Duvat-Magnan, V., et Magnan A. *Des catastrophes ... naturelles?* Paris: Pommier, 2014.

Dwyer, A., Zoppou C., Nielsen O., Day S., et Roberts S. *Quantifying Social Vulnerability: A Methodology for Identifying Those at Risk to Natural Hazards*. Canberra, Australia: Geoscience Australia, 2004.

Dykes, J., et International Cartographic Association, éd. *Exploring Geovisualization*. Reprinted. Amsterdam: Elsevier[u.a.], 2007.

Dzeakou, P., et Derniame J-C. « Conception des systèmes d'information des observatoires environnementaux », 2000.

E

Eco, U., et Cantagrel L. *Comment écrire sa thèse*, Broché. Essais. Flammarion, 2016.

Emrich, C.T., et Tobin G.A. « Resilience: An Introduction ». In *Vulnerability and resilience to natural hazards*, 124-44. Cambridge University Press, 2018.

Ercole (d'), R., Thouret J-C., Aste J-P., Dollfus O., et Gupta A. « Croissance urbaine et risques naturels: présentation introductive ». *Bulletin de l'Association de géographes français*, nº 4 (1995): 311–338.

Escarameia, M., et Stone K. « Technologies for Flood Protection of the Built Environment – Guidance based on findings from EU-funded project FloodProBE », 2013.

European Environment Agency. *Climate Change Adaptation and Disaster Risk Reduction in Europe: Enhancing Coherence of the Knowledge Base, Policies and Practices*, 2017. https://www.eea.europa.eu/publications/climate-change-adaptation-and-disaster/at_download/file.

F

Fekete, A. « Validation of a Social Vulnerability Index in Context to River-Floods in Germany ». *Natural Hazards and Earth System Science* 9, nº 2 (2009): 393-403. https://doi.org/10.5194/nhess-9-393-2009.

Finch, C., Emrich C.T., et Cutter S.L. « Disaster Disparities and Differential Recovery in New Orleans ». *Population and Environment* 31, nº 4 (2010): 179-202. https://doi.org/10.1007/s11111-009-0099-8.

Flanagan, B.E., Gregory E.W., Hallisey E.J., Heitgerd J.L., et Lewis B. « A Social Vulnerability Index for Disaster Management ». *Journal of Homeland Security and Emergency Management* 8, nº 1 (2011). https://doi.org/10.2202/1547-7355.1792.

Fleming, J., et Ledogar R.J. « Resilience, an Evolving Concept: A Review of Literature Relevant to Aboriginal Research ». *Pimatisiwin* 6, nº 2 (2008): 7-23.

Folke, C. « Resilience: The Emergence of a Perspective for Social–ecological Systems Analyses ». *Global Environmental Change* 16, nº 3 (2006): 253-67. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.04.002.

Folke, C., Carpenter S.R., Walker B., Scheffer M., Chapin T., et Rockstrom J. « Resilience thinking: integrating resilience, adaptability and transformability », 2010. http://www.treesearch.fs.fed.us/pubs/42598.

Folke, C., Carpenter S.R., Elmqvist T., Gunderson L., Holling C.S., et Walker B. « Resilience and sustainable development: building adaptive capacity in a world of transformations ». *AMBIO: A journal of the human environment* 31, nº 5 (2002): 437–440.

Foster, K.A. « In search of regional resilience ». In *Urban and Regional Policy and Its Effects*, Brooking Institution Press., 24-59, 2012.

Freudenberg, M. « Composite Indicators of Country Performance ». OECD Science, Technology and Industry Working Papers, 2003. https://doi.org/10.1787/405566708255.

Fuchs, S., et Thaler T., éd. *Vulnerability and resilience to natural hazards*. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2018.

Füssel, H-M. « Review and Quantitative Analysis of Indices of Climate Change Exposure, Adaptive Capacity, Sensitivity, and Impacts » World Development Report (2010): 36.

G

Galland, J-P. « Critique de la notion d'infrastructure critique ». *Flux*, nº 81 (2010): 6-18.

Gallopín, G.C. *A Systems Approach to Sustainability and Sustainable Development*. Santiago de Chile: Naciones Unidas, CEPAL/ECLAC, Sustainable Development and Human Settlements Division, 2003. http://www.cepal.org/publicaciones/MedioAmbiente/4/LCL1864PI/lcl1864i.pdf.

Gardner, G. « The City: A System of Systems ». In *State of the World*, par Worldwatch Institute, 27-44. Washington, DC: Island Press/Center for Resource Economics, 2016. https://doi.org/10.5822/978-1-61091-756-8_3.

Gayte, O., Libourel T., Cheylan J-P., et Lardon S. *Conception des systèmes d'information sur l'environnement*. Paris: Hermès, 1997.

Gersonius, B., Ashley, R., Pathirana, A., Zevenbergen, C., 2013. Climate change uncertainty: building flexibility into water and flood risk infrastructure. Clim. Change 116, 411–423. https://doi.org/10.1007/s10584-012-0494-5

Gisclard, B. « L'innovation sociale territorialisée: un levier de réappropriation du risque inondation par les habitants ». Université d'Avignon et des pays de Vaucluse, 2017.

Gonçalves, C. « Framework and Indicators to Measure Urban Resilience », 16. Dublin, 2013.

Goëta, S., et Mabi C. « L'open data peut-il (encore) servir les citoyens ? » *Mouvements* 79, nº 3 (2014) : 81. https://doi.org/10.3917/mouv.079.0081.

Gonzva, M. « Résilience des systèmes de transport guidé en milieu urbain : approche quantitative des perturbations et stratégies de gestion ». Université Paris-Est, 2017.

Gunderson, L.H., et Holling C. S., éd. *Panarchy: understanding transformations in human and natural systems*. Washington, DC: Island Press, 2002.

H

Hallegatte, S., et Engle N.L. « The Search for the Perfect Indicator: Reflections on Monitoring and Evaluation of Resilience for Improved Climate Risk Management ». *Climate Risk Management* 23 (2019): 1-6. https://doi.org/10.1016/j.crm.2018.12.001.

Havel, V. *Il est permis d'espérer*. Petite bibliothèque des idées. Paris: Calmann-Lévy, 1997.

Heinzlef, C. *Recettes de résilience urbaine. Comment réagir face aux inondations?* Broché. Midisciences. Pu.Avignon, 2019. https://livre.fnac.com/a13652628/Charlotte-Heinzlef-Recettes-de-resilience-urbaine.

Heinzlef, C., Becue V., et Serre D. « Operationalizing Urban Resilience to Floods in Embanked Territories – Application in Avignon, Provence Alpes Côte D'azur Region ». *Safety Science* 118 (2019): 181-93. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.05.003.

Hernandez, J. « ReNew Orleans? Resilience urbaine, mibilisation civique et création d'un capital de reconstruction" à la Nouvelle Orléans après Katrina ». Université Paris X-Nanterre, 2010.

Hernandez, J. « The Long Way Home : une catastrophe qui se prolonge à La Nouvelle-Orléans, trois ans après le passage de l'ouragan Katrina ». *Espace géographique* 38, nº 2 (2009): 124. https://doi.org/10.3917/eg.382.0124.

Hernandez, J. « Le tourisme macabre à La Nouvelle-Orléans après Katrina : résilience et mémorialisation des espaces affectés par des catastrophes majeures ». *Norois*, nº 208 (2008): 61-73. https://doi.org/10.4000/norois.2208.

Herring, D. « Climate change: global temperature projections », 2012. https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature-projections

Hinkel, J. « "Indicators of vulnerability and adaptive capacity": Towards a clarification of the science–policy interface ». *Global Environmental Change* 21, nº 1 (2011): 198-208. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.08.002.

Hoarau, C. « Représentations cartographiques intermédiaires: comment covisualiser une carte et une orthophotographie pour naviguer entre abstraction et réalisme? » Université Paris-Est, 2015.

Holand, I.S., Lujala P., et Rød J.K. « Social Vulnerability Assessment for Norway: A Quantitative Approach ». *Norsk Geografisk Tidsskrift - Norwegian Journal of Geography* 65, nº 1 (2011): 1-17. https://doi.org/10.1080/00291951.2010.550167.

Holling, C.S. « Resilience and stability of ecological systems ». *Annual review of ecology and systematics* 4, nº 1 (1973): 1–23.

Horton, B.P., Kopp R.E., Garner A.J., Hay C.C., Khan N.S., Roy K., et Shaw T.A. « Mapping Sea-Level Change in Time, Space, and Probability ». *Annual Review of Environment and Resources* 43, nº 1 (2018): 481-521. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-025826.

I

Institute for Economics and Peace. « Global Peace Index 2019 ». Institute for Economics and Peace, 2019. http://visionofhumanity.org/indexes/global-peace-index/.

IPCC. « Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate ». IPCC, 2019. https://www.ipcc.ch/srocc/home/.

Ionescu, S. « Origine et évolution du concept de résilience ». In *Résilience, connaissances de base*, Odile Jacob., 222, 2012.

J

Jackson, J.B., et Marot S. *De la nécessité des ruines et autres sujets*. Broché. Paris: Linteau, 2005.

Janssen, M., Charalabidis Y., et Zuiderwijk A. « Benefits, Adoption Barriers and Myths of Open Data and Open Government ». *Information Systems Management* 29, nº 4 (2012): 258-68. https://doi.org/10.1080/10580530.2012.716740.

Jean, G., Dubois J-L., et Droy I. « Report on social vulnerability indicators. Analytical framework and methodological considerations ». Paris: RE-InVEST, 2019.

Joerin, F. « Décider sur le territoire - Proposition d'une approche par utilisation de SIG et de méthodes d'analyse multicritère ». Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, 1997.

Johansson, J., Opach T., Glaas E., Neset T., Navarra C., Linner B-O, et Rod J.K. « VisAdapt: A visualization tool to support climate change adaptation ». *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2016, 1-1. https://doi.org/10.1109/MCG.2016.49.

Joliveau, T. « HDR - Géomatique et gestion environnementale du territoire.Recherches sur un usage géographique des SIG ». Jean Monnet, 2004.

Juanals, B. « L'encyclopédie, des Lumières au numérique: migration d'une utopie ». *Communication et langages* 131, nº 1 (2002) : 53-65. https://doi.org/10.3406/colan.2002.3125.

Jury, W. A., et Vaux H. « The Role of Science in Solving the World's Emerging Water Problems ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102, nº 44 (2005): 15715-20. https://doi.org/10.1073/pnas.0506467102.

K

Kane, I.O, et Vanderlinden J-P. « L'utilisation du concept polysémique de résilience : une analyse empirique en zone côtière ». *VertigO*, nº Hors-série 23 (2015). https://doi.org/10.4000/vertigo.16661.

Keenan, P.B, et Jankowski P. « Spatial Decision Support Systems: Three Decades on ». *Decision Support Systems* 116 (2019): 64-76. https://doi.org/10.1016/j.dss.2018.10.010.

Kervern, G-Y. *Eléments fondamentaux des cindyniques*. Paris: Economica, 1995.

King, D., et Macgregor C. *Using social indicators to measure community vulnerability to natural hazards*. Vol. 15, 2000.

Knabb, R.D, Rhome J.R, et Brown D.P. « Tropical Cyclone Report - Hurricane Katrina 23-30 August 2005 ». National Hurricane Center, 2005.

Koffi, J-M. « La résilience: origines et évolutions d'un concept polysémique ». In *Fragilités et résilience*, Karthala., 482. Paris, 2014.

Kraak, M. J., et Ormeling F. *Cartography: visualization of geospatial data*. 2nd ed. Harlow, England ; New York: Prentice Hall, 2003.

Kuhlicke, C., Steinführer A., Begg C., Bianchizza C., Bründl M., Buchecker M, De Marchi B., et al. « Perspectives on Social Capacity Building for Natural Hazards: Outlining an Emerging Field of Research and Practice in Europe ». *Environmental Science & Policy* 14, nº 7 (2011): 804-14. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2011.05.001.

Kunz, M., Mühr B., Kunz-Plapp T., Daniell J. E., Khazai B., Wenzel F., Vannieuwenhuyse M., et al. « Investigation of Superstorm Sandy 2012 in a Multi-Disciplinary Approach ». *Natural Hazards and Earth System Science* 13, nº 10 (2013): 2579-98. https://doi.org/10.5194/nhess-13-2579-2013.

Kurwakumire, E., Muchechetere P., Kuzhazha S., et Ikokou G.B. « Geographic Information and Geo-Visualisation in Support of Disaster Resilience ». *Proceedings of the ICA* 2 (2019): 1-8. https://doi.org/10.5194/ica-proc-2-68-2019.

Kwan, M-P, et Lee J. « Geovisualization of Human Activity Patterns Using 3D GIS: A Time-Geographic Approach ». *Spatially Integrated Social Science* 27 (2003).

L

Lacroix, S. *Ce que nous disent les ruines: la fonction critique des ruines*. L'Harmattan. Ouverture philosophique. Paris: L'Harmattan, 2007.

Laganier, R. « La résilience organisationnelle: se préparer et faire face à la crise ». In *Résiliences: sociétés et territoires face à l'incertitude, aux risques et aux catastrophes*, 141-58. ISTE éd., 2015.

Lajoie, G. « Recherches en modélisation urbaine. Habilitation à Diriger des Recherches ». Université de la Réunion, 2007.

Larrue, C., Bruzzone S., Lévy L., Gralepois M., Schellenberger T., Trémorin J.B., Fournier M., Manson C., Thuilier T., et STAR-FLOOD. *Analysing and Evaluating Flood Risk Governance in France: From State Policy to Local Strategies*, 2016.

Le Blanc, A. « Conserver les ruines en ville pour améliorer la résilience ? » In *Résiliences urbaines, les villes face aux catastrophes*, Le Manuscrit., 135-61. Recherche et Université. Paris, 2012.

———. « La conservation des ruines traumatiques, un marqueur ambigu de l'histoire urbaine ». *Espace géographique* 39, nº 3 (2010) : 253. https://doi.org/10.3917/eg.393.0253.

Lecombe, J. « La résilience après maltraitance, fruit d'une interaction entre l'individu et son environnement social », 2006. http://lodel.irevues.inist.fr/cahierspsychologiepolitique/index.php?id=1065.

Le Haut Comité Français pour la Défense Civile. « Retex suite à l'Ouragan Sandy », juillet 2013.

Ledoux, B. *La gestion du risque inondation*. Paris: Tec & doc, 2006.

Lhomme, S. « Les réseaux techniques comme vecteur de propagation des risques en milieu urbain. Une contribution théorique et pratique à l'analyse de la résilience urbaine ». Université Paris Diderot, 2012.

Lhomme, S., Serre D., Diab Y., et Laganier R.. « Analyzing Resilience of Urban Networks: A Preliminary Step towards More Flood Resilient Cities ». *Natural Hazards and Earth System Science* 13, nº 2 (2013): 221-30. https://doi.org/10.5194/nhess-13-221-2013.

Lhomme, S., Laganier R., Diab Y., et Serre D. « Un prototype SIG pour analyser la résilience urbaine : application à la ville de Dublin ». *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, nº Volume 13 Numéro 3 (2013). https://doi.org/10.4000/vertigo.14502.

Lhomme, S., Djament-Tran G., Reghezza-Zitt M., et Rufat S. « Penser la résilience urbaine ». In *Résiliences Urbaines, les villes face aux catastrophes*, Le Manuscrit., 13-46p. Recherche et Université, 2012.

Lhomme, S., Serre D., Diab Y., et Laganier R. « Les réseaux techniques face aux inondations, ou comment définir des indicateurs de performance de ces réseaux pour évaluer la résilience urbaine (Urban networks and floods : how to define performance indicators to evaluate urban resiliency) ». *Bulletin de l'Association de géographes français* 87, nº 4 (2010): 487-502. https://doi.org/10.3406/bagf.2010.8193.

Loireau, M. « Co-construction du concept d'observatoire scientifique en appui aux gestionnaires de territoire: OSAGE ». In *N° spécial géomatique*, 2017.

Loireau, M., Fargette M., Desconnets J-C., Mougenot I., et Libourel T. « Observatoire Scientifique en Appui à la GEstion du territoire (OSAGE) : entre espaces, temps, milieux, sociétés et informatique », 2015. http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010064550.

Loireau, M., et Miralles A. « Observatoires scientifiques Milieux/Société ». MAGIS-Groupement de recherche 2340 du CNRS (2017-2021), 2017. http://gdr-magis.imag.fr/?page_id=48.

Ludena, C.E, et Yoon S.W. « Local Vulnerability Indicators and Adptation to Climate Change: A Survey ». Inter-American Development Bank., 2015. https://www.uncclearn.org/sites/default/files/inventory/idb01062016_local_vulnerability_indicators_and_adaptation_to_climate_change_a_survey.pdf.

Lugeri, N., Kundzewicz Z.W., Genovese E., Hochrainer S., et Radziejewski M. « River Flood Risk and Adaptation in Europe—assessment of the Present Status ». *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 15, nº 7 (2010): 621-39. https://doi.org/10.1007/s11027-009-9211-8.

Luthar, S.S. « Resilience in Development: A Synthesis of Research across Five Decades ». In *Developmental Psychopathology*, édité par Dante Cicchetti et Donald J. Cohen, 739-95. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2015.https://doi.org/10.1002/9780470939406.ch20.

Luthar, S.S., Cicchetti D., et Becker B. « The Construct of Resilience: A Critical Evaluation and Guidelines for Future Work ». *Child Development* 71, nº 3 (2000): 543-62. https://doi.org/10.1111/1467-8624.00164.

M

Maby, J. « Approche conceptuelle et pratique des indicateurs en géographie ». In *Objets et indicateurs géographiques*, A.Barthelemy., 316. UMR Espace, Université d'Avignon, 2003.

MacEachren, A.M., Gahegan M., Pike W., Brewer I., Cai G., Lengerich E., et Hardisty F. « Geovisualization for Knowledge Construction and Decision Support ». *IEEE Computer Graphics and Applications* 24, nº 1 (2004) : 13-17.

Maceachren, A.M., et Kraak M.J. « Exploratory Cartographic Visualization: Advancing the Agenda ». *Computers & Geosciences* 23, nº 4 (1997) : 335-43. https://doi.org/10.1016/S0098-3004(97)00018-6.

Mancebo, F. « Katrina et la Nouvelle-Orléans : entre risque « naturel » et aménagement par l'absurde ». *Cybergeo*, 2006. https://doi.org/10.4000/cybergeo.90.

Marzouki, A., Lafrance F., Daniel S., et Mellouli S. « The Relevance of Geovisualization in Citizen Participation Processes ». In *Proceedings of the 18th Annual International Conference on Digital Government Research - Dg.o '17*, 397-406. Staten Island, NY, USA: ACM Press, 2017. https://doi.org/10.1145/3085228.3085240.

Maskey, S. *Modelling Uncertainty in Flood Forecasting Systems*. CRC Press, 2004.

Meerow, S, Newell J.P., et Stults M. « Defining Urban Resilience: A Review ». *Landscape and Urban Planning* 147 (2016): 38-49. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.11.011.

Merad, M., Chojnacki E., et Rouïl L. « Prise en compte des incertitudes dans la cartographie des risques - Quelques recommandations dans le cas de la prévention des pollutions atmosphériques ». In *Congrès Lambda Mu 20 de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement*. IMdR, 2016. https://doi.org/10.4267/2042/61762.

Merad, M., Dechy N., Llory M., Marcel F., et Tsoukias A. « Towards an Analytics and an Ethics of Expertise: Learning from Decision-Aiding Experiences in Public Risk Assessment and Risk Management ». *EURO Journal on Decision Processes* 2, nº 1-2 (2014): 63-90. https://doi.org/10.1007/s40070-013-0022-5.

Mérini, C., et Ponté P. « La recherche-intervention comme mode d'interrogation des pratiques ». *Savoirs* 16, nº 1 (2008) : 77. https://doi.org/10.3917/savo.016.0077.

Mermet, L. « La « concertation » : un terme flottant pour un domaine mouvant ? » *Négociations* 5, nº 1 (2006) : 75. https://doi.org/10.3917/neg.005.0075.

Meschinet de Richemond, N., et Reghezza M.. « La gestion du risque en France : contre ou avec le territoire ? » *Annales de géographie* 673, nº 3 (2010) : 248. https://doi.org/10.3917/ag.673.0248.

Metropolis Observatory, et 100 Resilient Cities. « The Metropolitan Scale of Resilience », décembre 2017.

Mitchell, J.K., éd. *Crucibles of hazard: mega-cities and disasters in transition*. Tokyo: New York : United Nations University Press, 1999.

Mitigation Assessment Team Report. « Hurricane Sandy in New Jersey and New York. Building Performance Observations, Recommendations, and Technical Guidance ». Federal Emergency Mangement Agency, novembre 2013.

Moreau, Y. *Vivre avec les catastrophes*. 1re éd. L'écologie en questions. Paris: PUF, 2017.

Morin, E. *Introduction à la pensée complexe*. Points Essais. Points, 2014.

Mustajoki, J., Hämäläinen R.P., et Marttunen M. « Participatory Multicriteria Decision Analysis with Web-HIPRE: A Case of Lake Regulation Policy ». *Environmental Modelling & Software* 19, nº 6 (2004): 537-47. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2003.07.002.

N

Nöllenburg, M. « Geographic Visualization ». In *Human-Centered Visualization Environments*, édité par Andreas Kerren, Achim Ebert, et Jörg Meyer, 4417:257-94. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007. https://doi.org/10.1007/978-3-540-71949-6_6.

Nones, M., et Pescaroli G.. « Implications of Cascading Effects for the EU Floods Directive ». *International Journal of River Basin Management* 14, nº 2 (2016): 195-204. https://doi.org/10.1080/15715124.2016.1149074.

November, V. « Risques naturels et croissance urbaine : réflexion théorique sur la nature et le rôle du risque dans l'espace urbain ». *Revue de géographie alpine* 82, nº 4 (1994) : 113-23. https://doi.org/10.3406/rga.1994.3778.

O

Observatoire des territoires. « ITDD-Taux de couverture des zones inondables et part de la population estimée en zone inondable », 2015. https://www.observatoire-des-territoires.gouv.fr/observatoire-des-territoires/fr/itdd-taux-de-couverture-des-zones-inondables-et-part-de-la-population-estim-e-en-zone-inondable.

Observatoires régional des risques en PACA. « Reconnaissances de catastrophes naturelles en région Provence-Alpes-Côte d'Azur », 2017. http://observatoire-regional-risques-paca.fr/sites/default/files/fiche2_sinistralite_catnat_09_2017_0.pdf.

OECD, 2014. Étude de l'OCDE sur la gestion des risques d'inondation: La Seine en Île-de-France 2014. OECD Publishing, Paris.

Øien, K. « Risk Indicators as a Tool for Risk Control ». *Reliability Engineering & System Safety* 74, nº 2 (2001): 129-45. https://doi.org/10.1016/S0951-8320(01)00067-9.

Oliveira Mendes, J.M de. « Social Vulnerability Indexes as Planning Tools: Beyond the Preparedness Paradigm ». *Journal of Risk Research* 12, nº 1 (2009): 43-58. https://doi.org/10.1080/13669870802447962.

Opach, T., et Rød Jan K. « Cartographic Visualization of Vulnerability to Natural Hazards ». *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization* 48, nº 2 (juin 2013): 113-25. https://doi.org/10.3138/carto.48.2.1840.

P

Padilla, L.M., Creem-Regehr S.H., Hegarty M., et Stefanucci J.K. « Decision Making with Visualizations: A Cognitive Framework across Disciplines ». *Cognitive Research: Principles and Implications* 3, nº 1 (2018). https://doi.org/10.1186/s41235-018-0120-9.

Paquot, T. *L'urbanisme c'est notre affaire*. Broché. Comme un accordéon. Nantes: l'Atalante, 2010.

Parlement Européen. Directive Inondation, Pub. L. No. 2007/60/CE, 2007/60/CE 2007/60/CE (2007). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:32007L0060

Parris, T.M., et Kates R.W. « Characterizing and Measuring Sustainable Development ». *Annual Review of Environment and Resources* 28, nº 1 (2003): 559-86. https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.050302.105551.

Pasche, E., et Geisler T.R. « New strategies of damage reduction in urban areas proned to flood ». In *Urban Flood Management*, 101-17. London: Taylor and Francis Group, 2005.

Paulet, J-P. « Chapitre 2 - La ville en tant que système ». In *Manuel de géographie urbaine*, 31-46. U. Paris: Armand Colin, 2009. https://www.cairn.info/manuel-de-geographie-urbaine--9782200355708-p-31.htm.

Pelling, M. *The vulnerability of cities: natural disasters and social resilience*. London ; Sterling, VA: Earthscan Publications, 2003.

Pescaroli, G., Alexander, D., 2015. A definition of cascading disasters and cascading effects: Going beyond the "toppling dominos" metaphor. Planet@Risk 3, 58–67.

Pescaroli, G., et Kelman I. « How Critical Infrastructure Orients International Relief in Cascading Disasters ». *Journal of Contingencies and Crisis Management* 25, nº 2 (2017): 56-67. https://doi.org/10.1111/1468-5973.12118.

Pescaroli, G., et Nones M. « Cascading Events, Technology and the Floods Directive: future challenges ». Édité par M. Lang, F. Klijn, et P. Samuels. *E3S Web of Conferences* 7 (2016): 7003. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160707003.

Pinzon, D. « La majorité des villes du monde fortement exposées aux catastrophes naturelles ». ONU Info, 2018. https://news.un.org/fr/story/2018/10/1027962.

Plane, S. « Médium d'écriture et écriture littéraire ». *Le français aujourd'hui* 153, nº 2 (2006) : 33. https://doi.org/10.3917/lfa.153.0033.

Popovska, C., et Ivanoski D. « Flood Risk Assessment of Urban Areas ». In *Risk Management of Water Supply and Sanitation Systems*, édité par Petr Hlavinek, Cvetanka Popovska, Jiri Marsalek, Ivana Mahrikova, et Tamara Kukharchyk, 101-13. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2365-0_10.

Prior, T., et Hagmann J. « Measuring Resilience: Methodological and Political Challenges of a Trend Security Concept ». *Journal of Risk Research* 17, nº 3 (2014): 281-98. https://doi.org/10.1080/13669877.2013.808686.

Provitolo, D. « Resiliencery Vulnerability Notion-Looking in Another Direction in Order to Study Risks and Disasters ». In *Resilience and Urban Risk Management*, 192. CRC Press, 2012.

———. « Vulnérabilité et résilience: géométrie variable des deux concepts ». ENS Paris, 2009.

Provitolo, D. « Vulnérabilité aux inondations méditerranéennes en milieu urbain : une nouvelle démarche géographique ». *Annales de géographie* 653, nº 1 (2007) : 23. https://doi.org/10.3917/ag.653.0023.

Provitolo, D., et Reghezza-Zitt M. « Résilience et vulnérabilité: de l'opposition au continuum ». In *Résiliences: sociétés et territoires face à l'incertitude, aux risques et aux catastrophes*, ISTE Editions., 43-60. ISTE Editions. London, 2015.

Pumain, D. « Système de villes ». Hypergéo, 2014.

Q

Quenault, B. « Retour critique sur la mobilisation du concept de résilience en lien avec l'adaptation des systèmes urbains au changement climatique ». *EchoGéo*, nº 24 (2013). https://doi.org/10.4000/echogeo.13403.

R

Redeker, C. « Strategies of urban flood integration - Zollhafen Mainz ». In *Resilience and Urban Risk Management*, CRC Press., 8, 2012.

Reghezza, M. *Paris coule-t-il ?* Broché. Fayard, 2012.

———. « Réflexions autour de la vulnérabilité métropolitaine: la métropole parisienne face au risque de crue centennale. » Université de Nanterre-Paris X, 2006. https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-00123255/document.

Reghezza-Zitt, M., Rufat S., Djament-Tran G., Le Blanc A., et Lhomme S. « What Resilience Is Not: Uses and Abuses ». *Cybergeo*, 2012. https://doi.org/10.4000/cybergeo.25554.

Renschler, C., Frazier A., Arendt L., Cimellaro G., Reinhorn A., et Bruneau M. *Framework for defining and measuring resilience at the community scale: The PEOPLES resilience framework*, 2010.

Resilient Vejle, et 100 Resilient Cities. « Vejle's resilience strategy ». 100 Resilient Cities, 2013.

Ringenbach, L., 2010. Reconstruire la ville après la catastrophe. Vivre avec le risque inondation/ Résilience appliquée.

Rijke, J., Farrelly M., Brown R., et Zevenbergen C. « Configuring Transformative Governance to Enhance Resilient Urban Water Systems ». *Environmental Science & Policy* 25 (2013): 62-72. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2012.09.012.

Robert, B., et Cloutier I. « La mobilisation lors de l'anticipation d'une situation d'urgence : le défi de la collaboration multi-organisationnelle entre systèmes essentiels ». *Sécurité et stratégie* 10, nº 3 (2012): 16.

https://doi.org/10.3917/sestr.010.0016.

Robert, B., Hémond Y., et Cloutier I. « Un outil d'anticipation pour la résilience des infrastructures essentielles ». In *La ville résiliente, comment la construire?*, 155-73. SC HUM HORS COL. PU Montréal, 2017.

Robert, B., et Morabito L. *Réduire la vulnérabilité des infrastructures essentielles guide méthodologique*. Paris: Éd. Tec & doc : Lavoisier, 2009.

Robinson, G.M, et Carson D.A. « Resilient Communities: Transitions, Pathways and Resourcefulness: Resilient Communities ». *The Geographical Journal* 182, nº 2 (2016): 114-22. https://doi.org/10.1111/geoj.12144.

Rød, J.K., Berthling I., Lein H., Lujala P., Vatne G., et Bye L.M. « Integrated Vulnerability Mapping for Wards in Mid-Norway ». *Local Environment* 17, nº 6-7 (2012): 695-716. https://doi.org/10.1080/13549839.2012.685879.

Roy, B. *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Collection Gestion. Série Production et techniques quantitatives appliquées à la gestion. Paris: Economica, 1985.

Rufat, S. « Critique of Pure Resilience ». In *Resilience Imperative*, 201-28. Elsevier, 2015. https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-051-5.50011-5.

Ruth, M., et Coelho D. « Understanding and Managing the Complexity of Urban Systems under Climate Change ». *Climate Policy* 7, nº 4 (2007): 317-36. https://doi.org/10.1080/14693062.2007.9685659.

Rutter, M. « Psychosocial Resilience and Protective Mechanisms. » *American Journal of Orthopsychiatry* 57, nº 3 (1987): 316-31. https://doi.org/10.1111/j.1939-0025.1987.tb03541.x.

———. « Resilience Concepts and Findings: Implications for Family Therapy ». *Journal of Family Therapy* 21, nº 2 (1999): 119-44. https://doi.org/10.1111/1467-6427.00108.

Rutter, M., et Zigler E.F. « Resilience Reconsidered: Conceptual Considerations, Empirical Findings, and Policy Implications ». In *Handbook of Early Childhood Intervention*, par Edward F. Zigler, 651-82. édité par Jack P. Shonkoff et Samuel J. Meisels, 2e éd. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. https://doi.org/10.1017/CBO9780511529320.030.

S

Saint-Marc, C. « Formalisation et géovisualisation d'événements historiques issus de risques naturels pour la compréhension des dynamiques spatiales. Application aux inondations ayant touché le système ferroviaire français ». Université Grenoble Alpes, 2017. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01739784.

Schipper, L., et Langston L. « A comparative overview of resilience measurement frameworks: analyzing indicators and approaches ». Unpublished, 2015. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2430.0882.

Sède-Marceau, M-H de, et Moine A. « Les Observatoires Territoriaux. Une Représentation Collective Du Territoire ». *Communication & Langages* 2012, nº 171 (2012) : 55-65. https://doi.org/10.4074/S0336150012011052

Sède-Marceau, M-H de, Moine A et Thiam S. « Développement d'observatoires territoriaux, entre complexité et pragmatisme », 29, 2009.

Serre, D. « Advanced methodology for risk and vulnerability assessment of interdependency of critical infrastructure in respect to urban floods ». Édité par M. Lang, F. Klijn, et P. Samuels. *E3S Web of Conferences* 7 (2016): 7002. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160707002.

Serre, D. « DS3 Model Testing: Assessing Critical Infrastructure Network Flood Resilience at the Neighbourhood Scale ». In *Urban Disaster Resilience and Security*, édité par Alexander Fekete et Frank Fiedrich, 207-20. Cham: Springer International Publishing, 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68606-6_13.

———. « La ville résiliente aux inondations Méthodes et outils d'évaluation ». Université Paris-Est, 2011. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00777206/.

———. « Les réseaux techniques urbains : des infrastructures essentielles pour la mise en place de stratégies de résilience ». *Sécurité et stratégie* 18, nº 1 (2015) : 28. https://doi.org/10.3917/sestr.018.0028.

Serre, D., Douvinet J., Heinzlef C., Lacombe E.D., et (sous la direction de) Vinet. « Les territoires endigués, quelles stratégies adopter pour y poursuivre l'urbanisation? » In *Le risque inondation*, ISTE (sous presse)., 2017.

Serre, D., et Heinzlef C. « Assessing and Mapping Urban Resilience to Floods with Respect to Cascading Effects through Critical Infrastructure Networks ». *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2018. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.02.018.

Serre, D., Barroca B., et Laganier R., éd. *Resilience and Urban Risk Management*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2013.

Sheppard, S. « Infill and the microstructure of urban expansion ». Homer Hoyt Advanced Studies Institute, 2007.

Suárez, M., Gómez-Baggethun E., Benayas J., et Tilbury D. « Towards an Urban Resilience Index: A Case Study in 50 Spanish Cities ». *Sustainability* 8, nº 8 (2016): 774. https://doi.org/10.3390/su8080774.

T

Tacnet, J-M, Dezert J., Curt C., Batton-Hubert M., et Chojnacki E. « How to Manage Natural Risks in Mountain Areas in a Context of Imperfect Information? New Frameworks and Paradigms for Expert Assessments and Decision-Making ». *Environment Systems and Decisions* 34, nº 2 (2014): 288-311. https://doi.org/10.1007/s10669-014-9501-x.

Tate, E. « Social Vulnerability Indices: A Comparative Assessment Using Uncertainty and Sensitivity Analysis ». *Natural Hazards* 63, nº 2 (2012): 325-47. https://doi.org/10.1007/s11069-012-0152-2.

Terrin, J-J. *Le projet du projet: concevoir la ville contemporaine*. Marseille: Parenthèses, 2014.

Terrin, J-J, Marie J-B, et Bauduceau N., éd. *Villes inondables: prévention, adaptation, résilience ; Rotterdam, Dordrecht, Dunkerque, Hambourg, Mayence, Lyon, Nîmes, Marseille, Toulouse = Cities and flooding*. Collection La ville en train de se faire. Marseille: Éd. Parenthèses, 2014.

Tisseron, S. *La résilience*. Que sais-je? Presses Universitaires de France-PUF, 2015.

Toubin, M. « Améliorer la résilience urbaine par un diagnostic collaboratif: l'exemple des services urbains parisiens face à l'inondation ». Paris-Diderot, 2014.

Toubin, M., Lhomme S., Diab Y., Serre D., et Laganier R. « La Résilience urbaine : un nouveau concept opérationnel vecteur de durabilité urbaine ? » *Développement durable et territoires*, nº Vol. 3, n° 1 (2012). https://doi.org/10.4000/developpementdurable.9208.

Thunberg, G., et Vasseur F. *Rejoignez-nous: #grevepourleclimat*, 2019.

U

UN General Assembly. « Sendai Framework for Disaster Risk Reduction », 2015.

UNISDR, et Center for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). « The Human cost of weather related disasters. 1995-2015 », 2015.

UNISDR. « Rendre les villes plus résilientes. Manuel à l'usage des dirigeants des gouvernements locaux ». Geneva, 2012. https://www.unisdr.org/campaign/resilientcities/.

United Nations. « 2018 Revision of Worl Urbanization Prospects », 2018. https://population.un.org/wup/.

United Nations. « 68% of the world population projected to live in urban areas by 2050 », 2018. https://www.un.org/development/desa/en/news/population/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html.

United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). « Flood Hazard and Risk Assessment », 2017. https://www.unisdr.org/we/inform/publications/57457.

V

Vale, L.J, et Campanella T.J. *The Resilient City, How modern Cities Recover from Disaster*. Broché, 2005.

Vallat, C., éd. *Pérennité urbaine, ou, La ville par-delà ses métamorphoses*. L'Harmattan. Itinéraires géographiques. Paris: Harmattan, 2008.

Vanderlinden, J-P, Baztan J., Touili N., Kane I.O., Rulleau B., Simal P., Pietrantoni L., Prati G., et Zagonari F. « Coastal Flooding, Uncertainty and Climate Change: Science as a Solution to (Mis) Perceptions? A Qualitative Enquiry in Three Coastal European Settings ». *Journal of Coastal Research* 77 (2017): 127-33. https://doi.org/10.2112/SI77-013.1.

Vargas, F. *L'humanité en péril: virons de bord, toute !* Broché. Flammarion, 2019.

Vaucluse, et Service interministériel régional de défense et de protection civiles. *Dossier départemental sur les risques majeurs dans le Vaucluse*. Marseille (6 rue d'Arcole, 13006): Approche Texte et image pour le compte du SIRDPC de la Préfecture du Vaucluse, 2008.

Veyret, Y., et Reghezza M. « Vulnérabilité et risques. L'approche récente de la vulnérabilité ». In *Annales des mines*, 43:9–13, 2006. http://www.annales.com/re/2006/re43/Veyret.pdf.

Vinet, F. *Le risque inondation: Diagnostic et gestion*. Broché. Tec & Doc Lavoisier, 2010.

W

Walker, B., Holling C.S., Carpenter S.R., et Kinzig A. « Resilience, Adaptability and Transformability in Social-ecologial Systems ». *Ecology and Society*, 2004.

Wallemacq, P., et House R. « Economic losses, poverty and disasters: 1998-2017 ». Center for Research on the Epidemiology of Disaster (CRED), UNISDR, 2018. https://www.unisdr.org/files/61119_credeconomiclosses.pdf.

Wardekker, J. A, de Jong A., Knoop, J.M, et Van der Sluijs, J.P. « Operationalising a Resilience Approach to Adapting an Urban Delta to Uncertain Climate Changes ». *Technological Forecasting and Social Change* 77, nº 6 (juillet 2010): 987-98. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2009.11.005.

Wehn, U., Rusca M., Evers J., et Lanfranchi V. « Participation in Flood Risk Management and the Potential of Citizen Observatories: A Governance Analysis ». *Environmental Science & Policy* 48 (2015): 225-36. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2014.12.017.

Werner, E.E. « Resilience in Development ». *Current Directions in Psychological Science* 4, nº 3 (1995): 81-85.

Winderl, T. « Disaster Resilience Measurements. Stocktaking of ongoing efforts in developing systems for measuring resilience ». United Nations Development Programme, 2014.

Wisner, B, et Walter J. « Data or Dialog? The Role of Information in Disasters ». In *World Disasters Report: Focus on Information in Disasters*. Geneva: International Federation of Red Cross and Recent Crescent Societies, 2005. https://www.ifrc.org/en/publications-and-reports/world-disasters-report/wdr2005/wdr-2005---chapter-1-data-or-dialogue-the-role-of-information-in-disasters/.

Y

Yasobant, S., Vora K.S., Hughes C., Upadhyay A., et Mavalankar D.V. « Geovisualization: A Newer GIS Technology for Implementation Research in Health ». *Journal of Geographic Information System* 7, nº 1 (2015): 20-28. https://doi.org/10.4236/jgis.2015.71002.

Z

Zevenbergen, C. « Flood Resilience ». In *Resource Guide on Resilience*. IRGC 2016, 2016.

Zevenbergen, C., Cashman A., Evelpidou NE. Pasche E., Garvin S., et Ashley R. *Urban Flood Management*. CRC Press, 2010.