



HAL
open science

Des modèles multiples pour l'étude des risques et catastrophes

Damienne Provitolo

► **To cite this version:**

Damienne Provitolo. Des modèles multiples pour l'étude des risques et catastrophes. Géographie. Université Côte d'Azur, 2019. tel-02424470

HAL Id: tel-02424470

<https://shs.hal.science/tel-02424470>

Submitted on 27 Dec 2019

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.

Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches

**DES MODELES MULTIPLES POUR L'ETUDE DES RISQUES ET
CATASTROPHES**

Damienne Provitolo, Laboratoire Géoazur – UMR 7329

Spécialité : **Géographie**

Ecole doctorale : **Sociétés, Humanités, Arts et Lettres**

Soutenu publiquement le 6 décembre 2019, devant le jury constitué de :

Monsieur BARROCA Bruno

Maître de Conférence HDR, Rapporteur

Madame DAVOINE Paule-Annick

Professeure des Universités, Université Grenoble Alpes, Rapportrice

Monsieur PIGEON Patrick

Professeur des Universités, Université de Savoie, Rapporteur

Monsieur BERTELLE Cyrille

Professeur des Universités, Université Le Havre Normandie, Examineur

Monsieur BOUDOUKHA Abdel Halim

Professeur des Universités, Université de Nantes, Examineur

Monsieur LOZI René

Professeur émérite des Universités, Université Côte d'Azur, Examineur

Monsieur TRIC Emmanuel

Professeur des Universités, Université Nice - Sophia Antipolis, Référent

Monsieur DAUPHINE André

Professeur émérite des Universités, Université Nice - Sophia Antipolis, Membre invité

A Max, à Lou, à Antide

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Paule-Annick Davoine, Bruno Barroca et Patrick Pigeon d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ce mémoire. Je suis très honorée de leur présence et espère être à la hauteur de leurs exigences.

Je remercie également l'ensemble des membres éminents du jury, d'horizons disciplinaires différents, d'avoir accepté de participer à l'appréciation de ce mémoire : Cyrille Bertelle, Abdel Halim Boudoukha, René Lozi, Emmanuel Tric apporteront leur regard éclairé, chacun dans son domaine, respectivement l'informatique, la psychologie, les mathématiques et la géophysique.

Je suis très heureuse de la présence d'André Dauphiné, qui m'a été un guide scientifique depuis de longues années ; je lui dois et lui exprime toute ma reconnaissance pour la qualité de nos échanges.

Ce mémoire a bénéficié de la lecture attentive et des conseils avisés de Christiane Weber, que je remercie chaleureusement, et qui, bien que ne pouvant se joindre au jury, a su orienter mon travail dans les choix méthodologiques.

J'ai une pensée spéciale pour Pierre Frankhauser, avec qui j'ai eu la chance de travailler à l'UMR ThéMA et qui m'a amenée de manière rigoureuse à l'interdisciplinarité en m'associant à différents projets de recherche.

Ce plaisir à découvrir une altérité scientifique et à mettre en acte des recherches interdisciplinaires, je le dois également à de nombreux collègues que je souhaite ici plus particulièrement remercier :

Mes collègues géographes : Edwige Dubos-Paillard, Eric Daudé, Emmanuel Eliot, Pierre Frankhauser, Emmanuel Garbolino, Maryse Guigo, Sébastien Haule, Manuelle Lago, Franck Lavigne, Alexandra Lindenmann, Patrice Langlois, Sandra Pérez, Eliane Propeck-Zimmermann, Magali Reghezza, Anna Ribas, Léna Sanders, Damien Serre, Céline Tritz, Anne Tricot.

Mes collègues de l'équipe Risques : Aurélie Barats, Pierre Brigode, Alexandre Dano, Thomas Lebourg, Sébastien Migeon, Gueorgui Ratzov, Christophe Renac, Anthony Soive, et ceux de l'UMR Géoazur : Julien Balestra, Jean-Luc Berenguer, Frédéric Cappa, Françoise Courboulex, Louis De Barros, Anne Deschamps, Jean-Xavier Dessa, Sylvain Gallet, Riad Hassani, Fabrice Jouffray, Davide Oregioni, Laure Schenini, bien trop nombreux pour être tous cités ici.

Mes collègues mathématiciens, informaticiens et physiciens : Aziz Alaoui, Alexandre Berred, Rodolphe Charrier, Noël Dimarcq, Valentina Lanza, Jean-Pierre Müller, Nathalie Verdière, Pammy Manchanda.

Mes collègues écologues, économistes, juristes et psychologues : Dominique Ansel, Pierre Batteau, François Bousquet, Benoît Lallau, Didier Genin, Serban Ionescu, François Lefevre, Hubert Mazurek, Oscar Navarro, Denis Phan, Pascale Steichen, Valérie Sanseverino-Godfrin.

Je n'oublie surtout pas les acteurs institutionnels et opérationnels qui ont su répondre présents à mes nombreuses sollicitations, je leur adresse mon entière reconnaissance : le Commandant F. Fiorelli et le Lieutenant-Colonel F. Castagnola du Service Départemental d'Incendie et de Secours des Alpes-Maritimes ; le Chargé de mission Risques sismiques à la Direction Départementale des Territoires et de la Mer des Alpes-Maritimes, S. Liautaud ; le Directeur de la Prévention des Risques Majeurs de la Ville de Nice, Y. Ferrand, et le Chef du service Risques Majeurs, Y. Dorgigne ; le Service interministériel de défense et de protection civiles de la Préfecture des Alpes-Maritime ; la Vice-Présidente du Centre Communal d'Action Sociale de Nice, J. Martinaux ; la Commissaire divisionnaire de la Direction Départementale de la Sécurité Publique, M. Audigier ; la Responsable du département de la prévention, de la gestion des risques et des alertes sanitaires, S. Lalin ; les Ingénieurs Management du risque d'inondation au Syndicat Intercommunal de la Siagne et de ses Affluents, V. Huet et au Syndicat Mixte Inondations, Aménagement et Gestion de l'Eau, R. Dreyfus.

Enfin, je ne pourrais terminer sans remercier très sincèrement tous les collègues des services administratifs, informatiques, de documentation et de communication de Géoazur, pour leurs expertises toujours précieuses dans la mise en place des projets de recherche, la gestion des budgets, des missions, du fonds documentaire, du matériel informatique et des urgences, la valorisation des projets, et sans lesquels rien ne serait possible : Sandrine Bertetic, Magali Auvéuvre, Emilie Berry, David Chapeau, Candice Gaudin, Jean-Baptiste Gallois, Jelena Giannetti, Fabienne Graglia, Véronique Large, Lionel Maurino, Valérie Mercier, Corinne Nicolas-Cabane, Myriam Pennec, Caroline Ramel, Jenny Trévisan.

Merci à tous pour l'ensemble des bons moments partagés.

TABLE DES MATIERES

| | |
|--|-----|
| PREAMBULE | 7 |
| VOLUME 2 - POSITIONS, CONTRIBUTIONS SCIENTIFIQUES ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE DES MODELES MULTIPLES POUR L'ETUDE DES RISQUES ET CATASTROPHES | 8 |
| INTRODUCTION GENERALE..... | 9 |
| <u>PARTIE 1</u> | |
| DES MODELISATIONS CONCEPTUELLES ET ONTOLOGIQUES DES RISQUES ET DES CATASTROPHES | 18 |
| INTRODUCTION – OUVRIR LA GEOGRAPHIE DES RISQUES AU TRIPTYQUE ALEA-VULNERABILITE- RESILIENCE..... | 19 |
| CHAPITRE 1 - DES REFLEXIONS CONCEPTUELLES APPROFONDIS ENRICHISSENT LA CONNAISSANCE DES RISQUES ET DES CATASTROPHES MAJEURS | 19 |
| 1.1 LA RESILIENCE, UN ARC-EN-CIEL DE SENS QUI NOURRIT LE DEBAT INTERDISCIPLINAIRE | 20 |
| 1.2. LA RESILIENCE SYSTEMIQUE SE CONSTRUIT SUR UN CONTINUUM TEMPOREL | 28 |
| CONCLUSION | 32 |
| CHAPITRE 2 - LES CONCEPTS DE RESILIENCE ET DE VULNERABILITE : OPPOSITION, IMBRICATION OU CONTINUUM ? | 33 |
| 2.1. UNE OU DES VULNERABILITES | 33 |
| 2.2. LE COUPLE VULNERABILITE/RESILIENCE..... | 37 |
| 2.3. UN MODELE SYSTEMIQUE DE « VULNERABILITE RESILIENCEAIRE » | 42 |
| CONCLUSION | 48 |
| CHAPITRE 3 – UNE ONTOLOGIE CONCEPTUELLE DU DOMAINE DES RISQUES ET CATASTROPHES | 50 |
| 3.1 PRESENTATION DE L'ONTOLOGIE CONCEPTUELLE | 52 |
| 3.2. L'ONTOLOGIE APPLIQUEE A LA TRIPLE CATASTROPHE DU JAPON..... | 70 |
| CONCLUSION | 73 |
| <u>PARTIE 2</u> | |
| DES MODELISATIONS DES CATASTROPHES ET DES COMPORTEMENTS HUMAINS SOUS LA FORME DE SYSTEMES DYNAMIQUES..... | 76 |
| INTRODUCTION – DES CHOIX DE MODELISATION DES SYSTEMES DYNAMIQUES..... | 77 |
| CHAPITRE 4 – DES MODELISATIONS DYNAMIQUES DE CATASTROPHES URBAINES | 80 |
| CONCLUSION | 84 |
| CHAPITRE 5 - DES MODELISATIONS DYNAMIQUES DES COMPORTEMENTS DE PANIQUE | 85 |
| 5.1. UN RAPIDE TOUR D'HORIZON SUR LA NOTION DE COMPORTEMENT ET SA MOBILISATION EN GEOGRAPHIE DES RISQUES | 86 |
| 5.2. UN PREALABLE A LA MODELISATION DU PANEL DES COMPORTEMENTS HUMAINS : COMPRENDRE LES COMPORTEMENTS DE PANIQUE | 88 |
| CONCLUSION | 98 |
| CHAPITRE 6 – DE L'OBSERVATION A LA SIMULATION DE LA DIVERSITE DES COMPORTEMENTS HUMAINS LORS DE CATASTROPHES | 99 |
| 6.1. UNE TYPOLOGIE DES COMPORTEMENTS HUMAINS ASSOCIES AUX CATASTROPHES | 99 |
| 6.2. LE MODELE MATHEMATIQUE PCR (PANIQUES-CONTROLES-REFLEXES) | 107 |
| CONCLUSION | 116 |

PARTIE 3

| | |
|---|------------|
| DES MODELES DE VULNERABILITE ET RESILIENCE POUR ACCOMPAGNER LA DECISION PUBLIQUE | 120 |
| INTRODUCTION – DES MODELES DECISIONNELS..... | 121 |

CHAPITRE 7 – SE PREPARER AU RISQUE DE TSUNAMI D'ORIGINE SISMIQUE EN MEDITERRANEE

| | |
|---|------------|
| 7.1. DES MODELES DECISIONNELS CARTOGRAPHIQUES | 125 |
| 7.2. LOCALISER DE FAÇON OPTIMALE DES SITES REFUGES DANS LE CAS D'UNE AUTO-EVACUATION DES POPULATIONS | 132 |
| CONCLUSION | 140 |

CHAPITRE 8 – DES ACTIONS POUR UNE RESILIENCE OPERATIONNELLE

| | |
|---|------------|
| 8.1. UN PROTOCOLE DE COMMUNICATION SUR LA CULTURE DU RISQUE D'INONDATION | 142 |
| 8.2. DES ATELIERS SUR LES COMPORTEMENTS HUMAINS EN CAS DE TREMBLEMENT DE TERRE ET DE TSUNAMI | 153 |

PARTIE 4

| | |
|---|------------|
| MES PERSPECTIVES DE RECHERCHE..... | 158 |
|---|------------|

| | |
|---|------------|
| INTRODUCTION – LES NOUVEAUX HORIZONS DES RISQUES ET CATASTROPHES | 159 |
|---|------------|

CHAPITRE 9 - LA RESILIENCE, LA SECURITE ET LA SURETE DES POPULATIONS : « PREDIRE » ET ANTICIPER LES COMPORTEMENTS HUMAINS, INDIVIDUELS ET COLLECTIFS, ET LEURS DYNAMIQUES SPATIO-TEMPORELLES ...

| | |
|--|------------|
| 9.1. DES METHODES D'OBSERVATION, D'ENQUETES ET D'EXPERIMENTATION | 163 |
| 9.2. LA MODELISATION DES DYNAMIQUES SPATIO-TEMPORELLES DES COMPORTEMENTS HUMAINS ET DES EVACUATIONS DANS DES CONDITIONS D'URGENCE | 187 |
| 9.3. LE DEVELOPPEMENT D'UNE PLATE-FORME POUR L'ANALYSE ET LA SIMULATION COMPORTEMENTALES DES POPULATIONS URBAINES EN SITUATION DE CATASTROPHE | 202 |
| CONCLUSION – LES RESULTATS ATTENDUS DU PROGRAMME DE RECHERCHE COM2SiCA..... | 209 |

CHAPITRE 10 – LA RESILIENCE DES VILLES, DES LITTORAUX URBANISES ET DES ORGANISATIONS DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS GLOBAUX : VERS UNE DEMARCHE OPERATIONNELLE GLOBALE

| | |
|---|------------|
| 10.1. RENDRE LE CONCEPT DE RESILIENCE OPERATIONNEL PAR DES APPROCHES QUALITATIVES | 212 |
| 10.2. RENDRE LE CONCEPT DE RESILIENCE OPERATIONNEL PAR DES APPROCHES QUANTITATIVES | 218 |

| | |
|----------------------------------|------------|
| CONCLUSION GENERALE | 224 |
|----------------------------------|------------|

| | |
|--------------------------------------|------------|
| TABLE DES ILLUSTRATIONS | 227 |
|--------------------------------------|------------|

| | |
|--------------------------------|------------|
| TABLE DES FIGURES | 227 |
|--------------------------------|------------|

| | |
|--------------------------------|------------|
| TABLE DES TABLEAUX..... | 229 |
|--------------------------------|------------|

| | |
|--------------------------------------|------------|
| TABLE DES PHOTOGRAPHIES | 229 |
|--------------------------------------|------------|

| | |
|---------------------------|------------|
| BIBLIOGRAPHIE..... | 230 |
|---------------------------|------------|

PREAMBULE

Le volume 2 présente une synthèse de mes principaux travaux de recherche menés dans le domaine des modélisations conceptuelles, systémiques, mathématiques et décisionnelles. Ces modélisations ont été appliquées aux risques et catastrophes urbaines, aux vulnérabilités et résiliences sociétales et territoriales et aux comportements humains. Les travaux de recherche présentés ont été effectués au sein de l'UMR ThéMA puis de Géoazur et sont le fruit de mon travail personnel, de collaborations avec des chercheurs de disciplines variées, et avec des doctorants et stagiaires de M2, M1 et L3 avec qui j'ai eu la satisfaction de travailler depuis mon intégration au CNRS. Ce mémoire porte sur des problématiques scientifiques relatives à l'observation, la conceptualisation et la modélisation des risques et catastrophes de toute origine (naturelle, technologique ou sociétale). Leurs caractéristiques sont d'être complexes, soudaines, imprévues et à dynamique rapide. Ce volume 2 ouvre aussi le champ à des perspectives de recherche sur la sécurité et la sûreté des populations, des organisations et des villes.

VOLUME 2

**POSITIONS, CONTRIBUTIONS SCIENTIFIQUES ET
PERSPECTIVES DE RECHERCHE**

**DES MODELES MULTIPLES POUR L'ETUDE DES
RISQUES ET CATASTROPHES**

INTRODUCTION GENERALE

« La science en tant que pratique sociale donne lieu à des productions de connaissances qui prennent la forme de concepts, de lois, de théories ou de procédures méthodologiques » (Désautels et Larochelle, 1989)

L'intérêt porté aux risques et aux catastrophes n'a cessé de croître depuis une trentaine d'années, tant dans la société civile que dans les mondes académique ou politique. Il est possible d'y voir l'influence de l'action des Nations Unies, qui a proclamé la période de 1990-1999 la Décennie Internationale pour la Prévention des Catastrophes Naturelles (DIPCN). Cette Décennie avait pour vocation de réduire les risques de catastrophes en ouvrant le champ des réflexions, notamment sur les concepts de vulnérabilité et d'exposition. Elle a été complétée par le protocole de Kyoto (signé en 1997) pour une stratégie de lutte contre le réchauffement climatique, puis par la Stratégie Internationale des Nations unies pour la Réduction des Catastrophes (adoptée en 2000 - UNISDR). Ces nouveaux cadres mobilisent un nouveau concept dans le domaine, celui de la résilience. En effet, la vision de la stratégie de prévention s'appuie sur trois objectifs du cadre d'actions de Hyogo pour 2005-2015 : pour des nations et des collectivités résilientes face aux catastrophes :

- intégrer la réduction des risques dans les politiques de développement durable et la planification ;
- développer les institutions, les mécanismes et les capacités pour renforcer la résilience face aux aléas ;
- intégrer des approches de réduction des risques dans la planification d'urgence, la réponse, et les programmes de récupération.

De plus, l'Union européenne développe une stratégie de réduction des risques de catastrophe (RRC) d'origine naturelle ou technologique dans les pays en développement et dans les pays et territoires d'outre-mer. Cette dernière s'est également inscrite dans le cadre d'actions de Hyogo pour 2005-2015. Elle doit être articulée avec les stratégies d'adaptation au changement climatique, avec les actions de prévention et de réaction aux crises d'origine humaine ou climatique et avec les Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD). Ces objectifs donnent une priorité locale, nationale et internationale à la réduction des risques et catastrophes. Enfin, la COP 21 ou Conférence de Paris a permis d'aboutir à un nouvel accord international sur le climat, applicable à tous les pays, visant à maintenir le réchauffement mondial en deçà du seuil de 2°C, conformément aux préconisations du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).

Ces actions s'inscrivent dans un contexte où la crainte des risques et des catastrophes est de plus en plus prégnante dans toutes les sociétés. Cette crainte est particulièrement marquée dans les sociétés développées, et ce même si les catastrophes, les pertes humaines et financières liées à ces événements sont inégalement réparties à l'échelle du globe et connaissent des évolutions différentes (Dauphiné et Provitolo, 2013).

Ces actions ne cessent de se renforcer face aux catastrophes qui frappent la planète. La liste des catastrophes du XXI^{ème} siècle serait trop longue pour toutes les citer mais qui ne

se souvient des attentats du World Trade Center (Etats-Unis) en 2001, du tsunami en Indonésie en 2004, de l'ouragan Katrina (Etats-Unis) en 2005, du tremblement de terre de l'Aquila (Italie) en 2009, de celui d'Haïti en 2010, de l'éruption du volcan islandais Eyjafjöll en 2010, de la tempête Xynthia (France et Europe) en 2010, de la triple catastrophe de Fukushima (Japon) en 2011, des inondations catastrophiques dans le Var en 2010 et les Alpes-Maritimes (France) en 2015, des inondations en Europe centrale en 2002, des attentats en France (Paris en 2015, Nice en 2016), en Europe (en Belgique à Bruxelles en 2016, en Espagne à Barcelone en 2017) et dans de nombreuses parties du monde (en Turquie à l'aéroport Atatürk en 2016, au Cachemire en 2019) etc.

Depuis le début de ma carrière, je m'intéresse à ces évènements catastrophiques, à leur compréhension et à leur anticipation sous l'angle des vulnérabilités et résiliences des territoires et des populations exposés. J'étudie ces évènements, non pas ceux-là spécifiquement dans leurs particularités, mais ceux-là du fait de leurs caractéristiques communes. Quelles sont ces caractéristiques qui font que je ne me suis ni focalisée sur une classe de risques ou de catastrophes (je fais référence ici aux classifications les plus académiques qui retiennent l'origine de l'aléa), et encore moins sur un évènement spécifique? Les évènements qui animent et alimentent mes réflexions peuvent être d'origine naturelle, technologique ou sociétale, peu importe. Leurs points communs, sur le plan des types d'évènements, sont d'être soudains, imprévus et à dynamique rapide. Leurs points communs, sur le plan de la science, sont d'être des systèmes complexes.

La complexité des risques et catastrophes a plusieurs origines. Tout d'abord, comme le précise E. Morin (2005), la complexité est une question de quantité. La complexité est engendrée par les nombreuses composantes qui caractérisent un risque ou une catastrophe. Cette complexité est multivariée et structurelle car les composantes sont hétérogènes et interagissent de manière non triviale (Zwirn, 2006). A côté d'une dimension physique, elle-même multidimensionnelle (par exemple géologique, hydraulique, climatique) ou d'une composante biologique, une catastrophe a aussi une dimension humaine, économique, financière, sociale, et même culturelle, voire politique. Cette complexité structurelle repose sur la définition même des concepts de risque et de catastrophe. Ces derniers sont en effet désormais définis par les spécialistes comme la combinaison d'aléa(s), de vulnérabilité(s) et aussi de résilience(s) pour certains auteurs (voir Cutter *et al.*, 2008 ; Dauphiné et Provitolo, 2013). Ces entités, pivots du système¹, participent au fonctionnement global du système. En l'absence de l'une ou l'autre de ces composantes, il ne peut y avoir de risque ou de catastrophe. Cette remarque n'est pas anodine. Pendant longtemps, les termes de risque et d'aléa étaient confondus, utilisés comme des synonymes, et ce particulièrement dans le domaine des risques naturels, tels que les inondations, les séismes ou les glissements de terrain. Cette vision simplifiée du concept a eu pour conséquence de favoriser les approches « aléa centré ». En fait, en négligeant l'entité vulnérabilité, et donc en omettant une partie du système, on passait à côté des aspects importants de la structure et du comportement global de la catastrophe. J'y reviendrai dans les deux premières parties de ce mémoire. Pour illustrer nos propos, le risque d'inondation est certes dépendant de l'intensité des apports de précipitation, mais il faut aussi tenir compte de l'extension des surfaces imperméabilisées, de la présence

¹ « Un système est un ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisés en fonction d'une finalité. Cette finalité est le maintien de la structure du système » (de Rosnay, 1975)

d'objets divers (troncs d'arbre, carcasse de voitures) dans le lit d'un fleuve ainsi que du comportement des habitants, qui veulent par exemple sauver leur voiture dans un garage en sous-sol, comme le montra la catastrophe de Mandelieu en 2015. Si les scientifiques du XIX^{ème} siècle et les médias d'aujourd'hui recherchent un unique facteur à l'origine d'un phénomène, les risques et les catastrophes échappent à cette logique : ils sont multifactoriels.

Du fait de la quantité et de l'hétérogénéité de ces éléments, mais aussi et surtout de la multiplicité des interactions qui relient les différentes entités d'une catastrophe, des effets de dominos de même nature ou de natures variées se produisent : naturelle et technique ou technologique, naturelle et sociale ou encore, pour prendre un dernier exemple, technique, naturelle et sociale. Ces effets de dominos, particulièrement prégnants en milieu urbain, sont créateurs de franchissement de multiples seuils de gravité dans des domaines variés, et ce pour un même risque ou une même métacatastrophe. Ces effets de dominos peuvent se déclencher durant la catastrophe (par exemple une inondation fait suite à une rupture de barrage, des mouvements de panique de foule sont provoqués lors de catastrophes naturelles, technologiques ou lors de rassemblements) ou apparaître après l'évènement (par exemple sur l'économie locale et/ou mondiale, sur les systèmes assurantiels, sur le rationnement énergétique et la difficulté d'approvisionnement à la suite de catastrophes nucléaires). Ces effets de dominos peuvent être ascendants ou descendants (par exemple une défaillance d'un réseau local d'électricité peut impacter le réseau global ou *vice versa*). Du fait des interconnexions multiples, des causalités circulaires se mettent en place, c'est-à-dire que les relations de cause à effet bouclent sur elles-mêmes et produisent des effets amplificateurs (on parle de boucle(s) de rétroaction(s) positive(s)) et/ou des effets réducteurs (on parle de boucle(s) de rétroaction(s) négative(s)). Ces boucles de rétroactions jouent par exemple un rôle clé dans l'émergence de panique collective, ou entre des actions d'aménagement du territoire, d'anticipation et réduction des risques (Arnaud et Davoine, 2009 ; Cœur, 2008 ; Pigeon et Rebotier, 2016). La complexité transversale sera abordée par la pratique de différentes formes de modélisation présentées dans la 1^{ère} et la 2^{ème} partie de ce tapuscrit.

La complexité puise ces racines dans les interactions entre échelles temporelles et spatiales ou niveaux d'organisation (Benkirane, 2002). Les risques et les catastrophes sont rarement enfermés dans une seule échelle spatiale, les niveaux local, régional, ou mondial et leurs impacts sont rarement circonscrits dans le seul champ où elles surviennent. Une catastrophe locale peut ainsi voir des impacts qui rejaillissent à différentes échelles et ceci concerne autant les risques nucléaires, que les risques naturels, sociétaux ou du vivant. Ainsi, compte tenu des interactions entre les économies, les marchés financiers internationaux ont été impactés à la suite des attentats de New York en 2001 et de la catastrophe nucléaire du Japon en 2011. Ce mélange d'échelles caractérise aussi des évènements plus lents, telles que les famines ou les épidémies. Elles débutent souvent dans quelques sites, mais elles s'étendent sur de vastes espaces régionaux ou nationaux, voire mondiaux dans le cas des épidémies et pandémies qui se propagent plus rapidement de nos jours du fait de la forte connexion entre les personnes et les territoires. La complexité est également liée au rythme temporel et plus spécifiquement au décalage des effets des catastrophes dans le temps. Dans le domaine des catastrophes nucléaires, une partie des populations n'est frappée par l'effet des radiations que des années plus tard. Proche, mais néanmoins différente, est la complexité de niveaux d'organisation. Elle est

engendrée par l'imbrication et l'articulation de divers niveaux (par exemple individu, famille, groupe, organisation) qui produisent l'émergence de nouvelles propriétés pouvant déclencher, renforcer ou affaiblir le risque ou la catastrophe. Ainsi, l'acte terroriste individuel, déclenché par un « loup solitaire » (par exemple lors de l'attentat de Nice le 14 juillet 2016), est différent du terrorisme organisé qui émerge à un autre niveau par interaction d'organisation constituée de groupes terroristes fonctionnant en réseaux (exemple de l'attentat du World Trade Center le 11 septembre 2001). Il en est de même pour la criminalité individuelle, qui a toujours existé, et qui est fort différente de la criminalité organisée qui émerge à une autre échelle, comme le démontre l'essor des mafias. Pour prendre un dernier exemple, en contexte de foule, des comportements individuels peuvent déboucher sur des paniques généralisées qui méritent une analyse globale. Je l'aborderai dans la deuxième partie de ce mémoire. Une distinction notable oppose ces deux types d'émergence. Dans le premier cas (celui du terrorisme organisé ou de la criminalité organisée), l'émergence est le fruit d'une intention prédéterminée alors que dans le second cas (celui de la panique collective), l'émergence est « la conséquence non intentionnelle et non voulue des actions d'un grand nombre de personnes mues par leurs seuls intérêts » (Friedman et Friedman, 1981).

Tous les risques sont multiéchelles et affichent des interactions entre ces différentes échelles. Non seulement les catastrophes varient d'intensité dans l'espace et le temps, mais il est courant qu'à l'intérieur d'une catastrophe s'inscrive un autre désastre de nature différente. Cet emboîtement explique le nombre élevé de victimes et la déstructuration des territoires, par exemple lors de la triple catastrophe de Fukushima. À l'intérieur des aires urbaines frappées par le tsunami d'origine sismique, une autre catastrophe se déroula, la mise hors service des systèmes de refroidissement de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi.

La complexité est due à des logiques d'interdépendance et de désorganisation des réseaux. La désorganisation des espaces concerne quelquefois des points, parfois des aires, et le plus souvent des réseaux. De nombreux dysfonctionnements urbains sont liés aux dysfonctionnements des réseaux (Barroca *et al.*, 2012 ; Toubin, 2011). Au plan fonctionnel, les réseaux d'énergie, d'information et de transport sont les plus menacés. Ces réseaux ont été par exemple paralysés, voire détruits, lors de l'ouragan Sandy qui toucha Haïti, Cuba puis les côtes américaines en octobre 2012. De même, lors des inondations catastrophiques de 2015 dans les Alpes-Maritimes, des zones situées en dehors du périmètre inondé ont perdu de leur accessibilité du fait de l'encombrement ou de la fermeture des voies. La désorganisation d'un réseau d'information freine la mise en place de mesures d'urgence, comme l'a montré l'effondrement d'une antenne en 1968 lors du tremblement de terre de Tokachi-Oki au Japon. Des îles furent isolées pendant plus de vingt-quatre heures. Les atteintes portées aux réseaux de transport gênent aussi la progression des secouristes pour intervenir sur site, pour évacuer les populations, pour acheminer de l'eau pour la population et éviter une catastrophe sanitaire. C'est pourquoi des recherches de plus en plus nombreuses portent sur l'étude de la résilience des systèmes techniques, notamment en milieu urbain du fait de l'interdépendance et de la connexité des réseaux durs et softs (Barroca, 2018 ; McNally *et al.*, 2007 ; Robert et Hémon, 2012 ; Serre, 2014).

Un autre point concernant la complexité est le fait d'avoir affaire à des systèmes complexes adaptatifs car au cœur de ces systèmes il y a des êtres humains (Zwirn, 2006 ;

Dupuy, 1991a). Ils apprennent, ont une mémoire, conservent une trace de l'histoire, s'adaptent à leur environnement et réagissent aux risques et aux catastrophes. Le concept de résilience illustre ces capacités. Je le présenterai dans la 1^{ère} partie. Durant la phase de risque, ces systèmes d'êtres humains vont ainsi mettre en place, à différents niveaux d'organisation (institutionnelle, collective ou individuelle), des actions pour traiter et réduire l'exposition et la vulnérabilité des systèmes, pour anticiper les risques de catastrophes, pour préparer les réponses aux catastrophes et renforcer leur résilience et celle des territoires (Reghezza et Rufat, eds, 2015). Par exemple, durant la phase de catastrophe, les acteurs opérationnels vont intervenir en situation d'urgence pour gérer l'évènement et ses impacts sur les territoires et les populations. Ces dernières ne restent pas passives, elles vont réagir en adoptant différents types de comportements, plus ou moins adaptés à la situation (Provitolo *et al.*, 2015). Nous le traiterons dans la 2^{ème} partie.

Enfin, la complexité de ces évènements est souvent due à la non linéarité des relations. En langage courant, cela signifie qu'une petite cause peut avoir de grands effets ou inversement. Les systèmes non linéaires², excessivement nombreux, sont la plupart extrêmement sensibles aux conditions initiales (effet gâchette, effet papillon). Dans certains cas, pour éviter que ces systèmes donnent des situations « explosives » on y adjoint des paramètres de contrôle. Des comportements imprévisibles, « contre-intuitifs » peuvent ainsi apparaître (Morin, 2005 ; Le Moigne, 1990). Un écart à peine perceptible à l'origine prend de l'ampleur au fil du temps et conduit le système vers un état non prévu. Cette imprédictibilité a été vulgarisée par la célèbre expression de l'« effet papillon » (Lorenz, 1972) lors d'une conférence scientifique intitulée : « Prédicibilité : le battement d'ailes d'un papillon au Brésil provoque-t-il une tornade au Texas ? » ou au contraire peut-il l'en empêcher ? Les exemples de ce type de complexité abondent dans les risques du vivant. La plupart des graves maladies en sont une illustration. Le cancer du poumon est souvent produit par le tabagisme ou par l'alcoolisme, mais ces deux addictions ne s'ajoutent pas (linéarité), elles se multiplient (non linéarité). Et, dans ce cas précis, il conviendrait d'inclure les conditions génétiques, qui peuvent réduire ou décupler ce risque. Pour modéliser ce cancer avec des paramètres de contrôle, on pourrait introduire le traitement par médicaments. De même, dans une foule, les populations raisonnées peuvent se transformer en populations paniquées, proportionnellement à la densité de chacune des deux variables qui se multiplient entre elles. Nous y reviendrons dans la deuxième partie.

Cette découverte scientifique va marquer la fin de l'utopie du contrôle dominante jusque dans les années 60. « La communauté scientifique pensait qu'à partir du moment où on arrivait à déterminer les lois qui régissent les phénomènes, on était à même de prévoir et reproduire ces phénomènes » (Israel, 2000), qu'il s'agit de phénomènes naturels (par exemple climatique), nucléaires, épidémiologiques, ou humains. Mais les travaux sur la complexité ayant révélé que l'avenir n'était pas prévisible, le risque nul n'existe pas car il nécessiterait de réussir à se prémunir contre tout ce qui peut se produire.

² Une relation est non linéaire si la relation entre X et Y n'est pas de la forme $Y = aX$, mais de type différent (sinusoïdal, logarithmique, exponentiel etc.).

Quelles solutions reste-t-il ? Ne pas adopter une culture fataliste, ou catastrophiste. Continuer à davantage expliquer et comprendre les risques de catastrophes et anticiper l'éventualité d'une catastrophe complexe.

Cette complexité des risques est des catastrophes, engendrée par divers mécanismes, ne peut pas être comprise et expliquée en recourant à un seul type de modèle. C'est pourquoi, au cours de mes recherches, j'ai diversifié les approches modélisatrices.

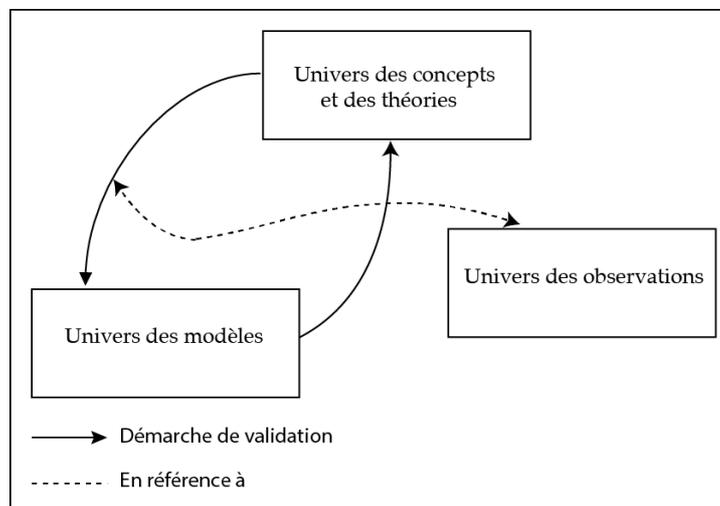
- **Les modélisations conceptuelles et ontologiques** ont été retenues afin de rendre intelligible un phénomène perçu comme complexe (Kant, 2012). J'ai ainsi élaboré des modèles conceptuels fournissant des cadres d'analyse des complexités structurelles du domaine des risques et catastrophes, et de celui des vulnérabilités et résiliences. L'élaboration de ces modèles conceptuels consiste à décrire le domaine d'étude en fonction de la problématique et des objectifs étudiés, d'identifier les concepts et les entités importants du domaine, de les organiser entre eux par des relations (Davoine, 2014). L'approche systémique (Le Moigne, 1977) et les méthodes conceptuelles en informatique ont été mobilisées pour formaliser les connaissances dans le domaine des risques et catastrophes. Le langage UML (*Unified Modelling Language*), reconnu comme un standard dans le domaine de la conception des systèmes d'information (Booch *et al.*, 1999), a été utilisé car il facilite le dialogue entre discipline et prépare l'implantation en machine.
- Les modèles peuvent aussi chercher à rendre possible l'expérimentation, la simulation (Kant, 2012), voire la prévision. Dans ce cadre, **les modélisations mathématiques** ont été privilégiées pour simuler des catastrophes soudaines et imprévues et leurs dynamiques, dans le temps et dans l'espace, ainsi que les comportements humains associés à ces événements. La puissance indiscutable de ces modélisations formelles est de pouvoir tester la sensibilité du modèle aux conditions initiales et les réponses du système aux changements des paramètres, et ce sans modifier la structure et les équations du modèle.
- Enfin, **les modèles d'aide à la décision**, permettant d'appuyer les opérationnels dans leur décision à une échelle locale, ont été élaborés pour les risques de tsunami en Méditerranée. Les modèles proposés fournissent sous forme cartographique de l'information spatialisée sur les enjeux territoriaux, les zones de vulnérabilités et la localisation d'abris. En appui, je mène également, dans un cadre institutionnel, des actions de sensibilisation aux réactions humaines en cas de survenue brutale et inattendue d'un danger.

Ces différentes formes de modélisation apportent des éléments de réponses aux questions suivantes :

- quelles sont les complexités structurelles et dynamiques du domaine des risques et catastrophes ?
- des processus simples peuvent-ils contribuer à l'émergence de comportements collectifs de panique ?
- quelles sont les dynamiques et séquences comportementales des réactions humaines ?
- comment réduire les vulnérabilités des populations ?

Ces modèles sont alimentés par l'univers des concepts et l'univers des observations (Livet, Phan et Sanders, 2014) (Fig. 1). Ce sont donc ces trois univers que je questionne dans le cadre de mes recherches sur les risques et catastrophes urbaines et complexes, trois univers que je mobilise, non pas en silo mais dans une logique d'interactions entre les savoirs issus des modélisations, des conceptualisations et des observations : il s'agit ainsi, par exemple, d'interpréter le monde de l'empirie, de l'observation à partir de cadres conceptuels thématiques, ou à l'inverse de dégager des concepts à partir de questions posées par l'observation, de construire un modèle à partir de connaissances empiriques ou théoriques, de le formaliser avec des méthodes mathématiques ou informatiques, de le calibrer via le domaine empirique, de l'affiner en le validant, d'explorer le modèle formel par la simulation, autant d'étapes scientifiques qui interagissent et qui permettent de rassembler un savoir parfois fragmentaire.

Figure 1 - Les trois univers de la science (Source : D. Provitolo et E. Dubos-Paillard, In : Dauphiné et Provitolo, 2013)



Pour élaborer et enrichir l'univers des modèles, j'ai ainsi mené :

- des réflexions approfondies sur les concepts de vulnérabilité et de résilience pour ouvrir la géographie des risques et catastrophes au cycle Aléa-Vulnérabilité-Résilience (Genin et Mazurek, 2016) et effacer les distinctions artificielles qui séparent notamment le domaine physique du champ social. Cet effacement des frontières disciplinaires permet de considérer les risques et les catastrophes comme des systèmes complexes adaptatifs, au sein desquels les êtres humains jouent un rôle clé. Ces réflexions alimentent les modèles conceptuels et d'aide à la décision. Elles permettent d'apporter un éclairage aux questions suivantes :
 - une ville, un territoire peuvent-ils être à la fois vulnérables et résilients ? La vulnérabilité et la résilience sont-elles deux composantes opposées (le côté négatif de la vulnérabilité qui montre les fragilités et le côté positif de la résilience qui permet de rebondir) ou des composantes aux relations complexes et enchevêtrées ?
 - existe-t-il des déterminants propres à la vulnérabilité et à la résilience territoriale ?

- à quelle(s) échelle(s) spatiale(s) et temporelle(s) penser la résilience et la vulnérabilité des systèmes (notamment ceux des villes) ?
- ces notions de vulnérabilités et résiliences sont-elles opérationnelles pour aider les acteurs institutionnels à prévenir les risques et gérer les catastrophes soudaines et imprévues ?
- des observations d'évènements et de comportements humains pour alimenter, valider ou affiner les modélisations L'univers de l'observation et des études de terrain (*via* l'analyse de vidéos, d'articles descriptifs, de documents d'archives, d'enquêtes) a permis de cerner la diversité des réactions humaines et d'affiner les modélisations mathématiques, en passant de l'étude d'un mono-comportement, la panique, à celle de comportements multiples, car les neurosciences enseignent que l'être humain ne reste pas figé dans un même état comportemental du début à la fin d'un évènement catastrophique. Les monographies et/ou articles de presse et vidéos de catastrophes majeures, celles du Grand Séisme de Kantô de 1923 (Hadfield, 1992 ; Crocq, 2013) et de la triple catastrophe de Fukushima en 2011 ont été utilisés pour instancier l'ontologie du domaine des risques et catastrophes et procéder à sa validation.

Ces recherches permettent de questionner :

- en quoi l'observation permet d'alimenter les modèles, d'imaginer leur construction, de tester les cadres proposés, de les valider, de les enrichir ?
- quels sont les comportements possibles face à un phénomène ? A quels comportements humains (ceux des population *lambda*), les acteurs opérationnels devront-ils faire face lors de catastrophes soudaines, imprévues et donc sans pré-alerte ?
- quelles sont les trajectoires de déplacement associées à ces comportements humains ?

J'ai mobilisé ces trois univers de la science, ces différents modes de raisonnement dès le début de ma carrière en soutenant en 2002 une thèse pluridisciplinaire sur les risques et catastrophes majeurs dans les villes méditerranéennes (Université de Nice - Sophia Antipolis – UMR ESPACE). Puis mon intérêt pour l'interdisciplinarité et la transdisciplinarité m'a amené à développer ou participer à des collaborations scientifiques avec des collègues de disciplines différentes, certaines du domaine des sciences humaines et sociales (l'urbanisme, le droit, l'économie, la psychologie pour cerner la complexité des risques et des comportements humains en situation de catastrophes), d'autres plus éloignées car appartenant aux mathématiques et à l'informatique pour modéliser les dynamiques temporelles et spatiales des comportements humains, aux sciences de la terre (la géologie et la sismologie pour développer une approche intégrée des risques de glissements de terrain et de tsunami cosmique), d'autres encore relevant des sciences du vivant (pour une approche socio-écologique des résiliences et des vulnérabilités pour l'adaptation des agrosystèmes aux changements globaux).

Au regard des 3 univers de la science et de mes focus de recherche, ce mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches est organisé en quatre parties, comme suit :

Partie 1 – Des modélisations conceptuelles et ontologiques des risques et des catastrophes

Partie 2 – Des modélisations des catastrophes et des comportements humains sous la forme de systèmes dynamiques

Partie 3 – Des modèles de vulnérabilité et résilience pour accompagner la décision publique

Partie 4 – Mes perspectives de recherche

PARTIE 1

**DES MODELISATIONS CONCEPTUELLES ET
ONTOLOGIQUES DES RISQUES ET DES CATASTROPHES**

Introduction - Ouvrir la géographie des risques au triptyque Aléa-Vulnérabilité-Résilience

Les études de risques et de catastrophes, qui accordaient une importance capitale aux aléas, ont changé d'objectifs. Elles mettent de plus en plus en avant les vulnérabilités et résiliences des systèmes affectés par une catastrophe. Mais si la science dispose d'un vocabulaire précis pour définir le concept d'aléa et sa multidimensionnalité, ce vocabulaire est mal fixé pour les concepts de vulnérabilité et de résilience. Ces termes étant polysémiques, il y a donc nécessité d'identifier les sens qui leur sont attribués et de proposer des modèles conceptuels pour formaliser les connaissances, décrire le domaine d'étude des risques et catastrophes, organiser entre eux les concepts par des relations (Davoine, 2014).

Dans ce contexte, mes recherches ont contribué à ouvrir la géographie des risques, initialement centrée sur l'étude de l'Aléa, au triptyque Aléa-Vulnérabilité-Résilience. J'ai ainsi mené des réflexions conceptuelles approfondies sur les vulnérabilités et résiliences sociétales et territoriales et proposé deux modélisations conceptuelles :

- l'une formalise les relations tissées entre les concepts de vulnérabilité et résilience à partir du modèle systémique de « vulnérabilité résilience »,
- l'autre propose une ontologie conceptuelle du domaine des risques et catastrophes.

Chapitre 1

Des réflexions conceptuelles approfondies enrichissent la connaissance des risques et des catastrophes majeurs

D'une manière générale, des réflexions constantes sont menées au travers de mes recherches sur les concepts de risque, de catastrophe, de vulnérabilité et de résilience. En géographie des risques et catastrophes, la mobilisation par la communauté scientifique française autour du concept de résilience est très récente et connaît un véritable engouement depuis quelques années. Mais quel est l'apport de ce nouveau concept ? Peut-on l'étendre et le mobiliser dans le domaine des risques et des catastrophes ? Quel nouveau regard la résilience nous permet-elle de porter sur des événements complexes et incertains ?

Au début des années 2000, je me suis intéressée au concept de résilience, à sa polysémie et j'ai expliqué l'intérêt de le mobiliser pour prévenir les risques et gérer les catastrophes (Dauphiné et Provitolo, 2007 ; Provitolo, 2012). En effet, les approches traditionnelles, centrées sur l'analyse et la maîtrise des aléas et la réduction des vulnérabilités ont montré leurs limites (Quenault, 2013), notamment car elles considèrent rarement la complexité des risques et catastrophes. Mobiliser la résilience dans ce domaine apparaît clairement prometteur pour articuler des phénomènes de nature et d'échelle différentes, pour faire face à des situations complexes et incertaines. Mobiliser ce concept pour améliorer la compréhension des catastrophes soudaines, imprévues et à dynamique rapide, m'a amenée à réaliser un état de l'art pour clarifier les significations de la résilience et découvrir sa profondeur historique.

Mes recherches ont été effectuées dans un cadre disciplinaire et interdisciplinaire, national et international. Elles m'ont amenée à collaborer avec des collègues géographes (notamment de l'ENS Paris, des UMRs ESPACE, LPED, de l'Université de Paris Est Créteil, de l'Université de Montréal, de l'Institut d'Urbanisme de Montréal), plus récemment avec des écologues des forêts méditerranéennes (INRA, LPED) et des psychologues (association RESILIO). Ces réflexions ont été valorisées notamment dans le cadre des séminaires de recherche de l'ENS Paris sur la résilience (sous la direction de M. Reghezza – ENS - Département de Géographie), de l'école chercheurs « Adaptation des agro-écosystèmes aux changements globaux : plus de résilience et moins de vulnérabilité ? » (sous la direction de F. Lefevre, INRA), de l'association internationale RESILIO pour la promotion et la diffusion de la recherche sur la résilience (sous la direction de S. Ionescu et H. Mazurek).

1.1 La résilience, un arc-en-ciel de sens qui nourrit le débat interdisciplinaire

Dans un contexte de changements globaux, de catastrophes majeures et de recherche de réduction des vulnérabilités humaines, les concepts et méthodes de la résilience sont de plus en plus investis par les acteurs institutionnels et les communautés scientifiques. Mais selon les disciplines et les courants de pensée qui le mobilisent, ce terme de résilience a plusieurs sens et est souvent utilisé pour décrire des faits différents. Les linguistes enseignent que la polysémie des mots ne peut jamais totalement disparaître. Mais il est préférable de la réduire pour améliorer la communication scientifique ! Cela est particulièrement vrai lorsque l'on travaille avec d'autres disciplines.

Apparu dès les années 70 dans la littérature scientifique traitant des risques et catastrophes (White, 1974), le concept de résilience a véritablement été investi par les cindyniques³ au début du XXI^{ème} siècle à la fois politiquement et scientifiquement. Politiquement lors de la Conférence mondiale de Hyogo (janvier 2005) sur la prévention des catastrophes, conférence qui souligne la nécessité de construire des nations et des collectivités résilientes face aux catastrophes⁴. Scientifiquement, car huit mois après cette conférence, la catastrophe liée aux inondations déclenchées par l'ouragan Katrina cristallise les débats sur les lacunes de la prévision et de la prévention, ainsi que les difficultés organisationnelles de la gestion de cette crise. Cet évènement, qui à l'échelle du globe n'en est pourtant qu'un parmi tant d'autres, a révélé la nécessité de se préparer à des catastrophes et crises de type systémique (Provitolo, 2002 ; Guilhou et Lagadec, 2006), voire même à des risques moins connus, moins prévisibles (par exemple la chute d'une météorite, l'impact d'astéroïdes).

Le monde scientifique questionne la polysémie du concept de résilience, son intérêt –ou non- pour la prévention et la gestion des risques et catastrophes, son opérationnalisation (Bourcart, 2015 ; Comfort *et al.* 2010 ; Châtaigner *et al.*, 2014 ; Folke, 2006 ; Ionescu *et al.*

³ Je reprends ici le néologisme introduit par G.-Y. Kervern lors du colloque fondateur qui s'est tenu à la Sorbonne en 1987 dans un sens très général, pour regrouper, par commodité, tout ce qui se rattache aux sciences du danger sous un même vocable.

⁴ L'ONU a adopté en 2005, dans le cadre de la stratégie internationale pour la réduction des catastrophes (ISDR) le cadre d'action de Hyogo (HFA), plan de dix ans (2005-2015) pour « rendre le monde plus sûr face aux catastrophes naturelles ». Ce plan, adopté par 168 États, a pour sous-titre : « construire la résilience aux catastrophes des nations et des communautés » [*Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters*].

2016 ; Pigeon, 2012 ; Pigeon *et al.*, 2018 ; Propeck Zimmerman *et al.* 2018 ; Provitolo *et al.* 2017 ; Quenault, 2013 ; Reghezza et Rufat Eds, 2015 ; Richemond, 2003 ; Serre, Barroca et Lagagnier, 2012 ; Tisseron, 2007 ; Walker *et al.*, 2004).

Cet engouement pour la résilience exige une utilisation rigoureuse du terme, ne serait-ce que pour déjouer les malentendus et l'inévitable confusion qui résulteraient de l'imprécision. Il est par conséquent indispensable d'en clarifier les définitions et les usages, en contextualisant les différentes acceptions. Ceci est d'autant plus important qu'il n'existe pas encore de véritable théorie formalisée pour expliquer le concept de résilience.

- Qui utilise la résilience, au service de quels questionnements, de quelle problématique scientifique ?
- La résilience d'un système consiste-t-elle à revenir à un état antérieur ou à se renouveler ? sur le plan de la finalité du système, s'agit-il de maintenir sa structure ? ou au contraire de proposer de nouvelles structures et fonctionnalités ?
- Y a-t-il modification du système consécutivement au choc ?

Si la résilience est un terme emprunté à la physique pour exprimer l'élasticité des matériaux, j'ai pu montrer, dans le cadre de la réalisation de différents états de l'art, que derrière ce mot se cache un arc-en-ciel de sens selon les disciplines (l'écologie, la psychologie, la géographie, les cindyniques), et le contexte (la politique, les milieux bancaires et assurantiels...) dans lequel il est mobilisé (Provitolo, 2009, 2012). Ainsi, il n'existe pas une mais plusieurs résiliences (Châtaignier *et al.* 2014 ; Tisseron, 2017 ; Provitolo et Reghezza, 2015), alors que paradoxalement, ce terme est majoritairement utilisé au singulier, et ce tant dans les approches scientifiques que les discours politiques.

1.1.1. Les origines du mot

Étymologiquement, la résilience vient du mot latin *salire* qui signifie sauter et du préfixe *re*, qui signifie que l'on saute en arrière. Mais comme l'a fait remarquer S. Tisseron (2017), il y a deux façons de sauter en arrière : l'une consiste à le faire pour réduire son exposition à la menace, l'autre dans le but de mieux rebondir. La première acception prend ancrage dans le verbe « résilier » (du latin *resilio*, *resilire*), résilier par exemple un contrat qui signifie l'annuler, le casser. La résilience consisterait donc « à retourner à son état d'origine », à retrouver l'état d'équilibre initial (Fig. 2a). La seconde se réfère au participe présent du mot latin, *resiliens*, lui donnant le sens de « rebond » en réaction à un choc (Châtaignier, 2014) pour trouver un nouvel état d'équilibre (Figs. 2b-2c) et non l'état d'équilibre antérieur au choc.

Ce rapide tour d'horizon sur les racines du mot résilience n'est pas anodin, ces dernières participant de sa polysémie, polysémie renforcée par l'utilisation multidisciplinaire de ce concept. En effet, la résilience est un concept d'origine physique, transféré en sciences sociales, après un détour par l'écologie. Lors de ces transferts entre les différentes sciences, le concept se diversifie. Pour certains, la résilience est un état ou une caractéristique d'un système, pour d'autres un processus lié à de multiples interactions entre des facteurs endogènes et exogènes, des situations qui vont engendrer ou pas des phénomènes de réaction, d'adaptation, de création (Guénin et Mazurek, 2016). Pour tous, elle est le résultat de la rencontre d'un système (système physique, territorial, socio-économique, écosystème, humain etc.) avec un choc, une adversité ou un traumatisme.

1.1.2. Des résiliences disciplinaires

D'abord utilisé en physique et en métallurgie (Gordon, 1978), le concept de résilience désigne initialement la capacité pour un métal d'absorber un choc ou une pression continue sans se rompre ou sans être déformé (Mathieu, 1991) : le matériau conserve sa forme en revenant à son état initial. La résilience fait alors référence aux caractéristiques intrinsèques des matériaux et à leur capacité de résistance à un choc ou une pression. Pour ceux qui s'inspirent directement de la dimension physique, la résilience est un trait caractéristique, une qualité à mettre en avant, comme par exemple les qualités indéformables d'un matelas résilient.

Cette approche physique de la résilience, basée uniquement sur la résistance, a structuré les réflexions initiales en écologie. Puis le concept a évolué et s'est enrichi à partir de son appropriation par différentes disciplines, notamment la psychologie, l'économie et les cindyniques. Ces disciplines se sont plus particulièrement intéressées aux catastrophes naturelles, à la guerre, au terrorisme et aux comportements stratégiques des entreprises.

a) Le concept de résilience en sciences écologiques : deux courants de pensée

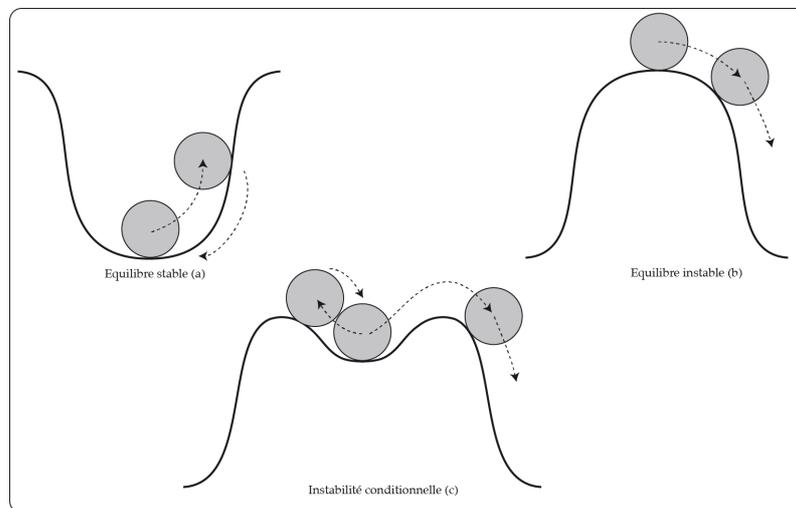
La résilience écologique correspond à la capacité d'un écosystème, d'une espèce, à récupérer un fonctionnement « normal » à la suite d'une perturbation. La question sous-jacente étant d'expliquer comment s'effectue ce retour à un fonctionnement « normal » et sur quelle temporalité. Dès 1973, dans un article fondateur, C.S. Holling définit la résilience comme la capacité d'un écosystème à intégrer dans son fonctionnement une perturbation quelconque sans modifier sa structure qualitative : c'est par exemple la reconstitution d'une forêt après un incendie ou une tempête (deux exemples de chocs brutaux bien connus des forêts de Provence et des Landes), ou encore l'équilibre entre des populations de prédateurs et de proies (les prédateurs pouvant exercer une pression continue sur les proies). La résilience correspond ainsi à la capacité d'un écosystème subissant une perturbation à perdurer sans se transformer. La finalité du système est de maintenir sa structure. Sa mesure s'effectue à partir de la résistance et de la rapidité de retour à l'état d'équilibre de départ. Cette mesure de la résilience, calculée soit par la variable du temps de retour, soit par celle de la vitesse de retour à l'équilibre (Pimm, 1984), conduit à ce qui a été qualifié d'*engineering resilience* (résilience ingénierale). Pour cette école de pensée, qu'Holling quittera quelques années plus tard, un système résilient est un système stable près d'un état d'équilibre permanent et unique (Fig. 2a). Le système est donc défini comme résilient s'il retrouve son état d'équilibre initial. On retrouve là l'approche physique de la résilience. La finalité du système est de retrouver sa structure initiale.

Cependant cette idée de retour à l'état d'équilibre initial a été contestée, Holling reconnaissant la faiblesse de cette hypothèse. Il précise alors qu'un écosystème résilient maintient ses fonctions et ses structures essentielles non pas en préservant un état d'équilibre unique, mais en passant par différents états d'équilibres, stables et instables (Holling, 2001) (Fig. 2c). **La résilience devient alors la capacité d'un système à absorber les perturbations et à se réorganiser tout en subissant des modifications.** Ce deuxième courant de pensée est nommé *ecosystem resilience* ou *ecological resilience*. La résilience consiste alors à retrouver un nouvel état d'équilibre à la suite d'une perturbation. On retrouve là l'idée du rebond, du changement d'état permettant de trouver un nouveau

domaine d'équilibre. Le maintien de la structure passée n'est plus la finalité du système, le système transite par des équilibres multiples : l'équilibre est stable pour les petites perturbations (petits déplacements pouvant correspondre à des événements mineurs) et instable pour les grandes perturbations (changement d'état pouvant correspondre à des événements majeurs).

Figure 2 – Une représentation d'équilibres stables et instables : analogie avec une sphère (Source : D. Provitolo in : A. Dauphiné et D. Provitolo, 2013)

Explication – L'équilibre exprime l'état d'un système (la sphère représente le système étudié, ce dernier pouvant tout aussi bien être un écosystème qu'une ville). Le système est stable s'il revient à son état d'équilibre initial suite à une perturbation (Fig. 2.a). Il est instable s'il s'éloigne de son état d'équilibre initial (Fig. 2.b). Enfin, le système est en instabilité conditionnelle si son équilibre est stable pour les petites perturbations (petits déplacements pouvant correspondre aux événements mineurs) et instable pour les grandes perturbations (changement d'état pouvant correspondre à des événements majeurs) (Fig. 2.c).



Pour illustrer ces propos, prenons l'exemple cité par Folke *et al.* (2004) de la transformation d'un récif corallien en un récif dominé par les algues suite à une modification de variables environnementales sur un temps long (par exemple surpêche) et à des déclencheurs impliqués dans le changement de domaine de stabilité (par exemple un ouragan). Du point de vue de l'*engineering resilience*, cet écosystème est considéré comme non résilient car il a quitté son domaine de stabilité, il n'est pas revenu à son état d'équilibre initial (le récif corallien). En revanche, il est qualifié de résilient car adaptatif du point de vue de l'*ecosystem resilience*.

Le concept d'*ecosystem resilience*, en dépassant le paradigme de l'équilibre unique, s'adapte mieux à l'étude des systèmes complexes adaptatifs (c'est-à-dire de systèmes possédant la capacité de changer, de s'adapter, d'apprendre avec l'expérience pour rebondir). Certes, tous les systèmes ne sont pas adaptatifs, mais tous ceux du monde vivant duquel font partir les sociétés humaines le sont. C'est pourquoi, les recherches menées en sciences humaines et sociales (Cutter *et al.*, 2008 ; Dauphiné et Provitolo, 2007 ; Gallopin, 2006 ; Quenault 2015 ; Reghezza et Rufat 2015 ; Serre *et al.*, 2012 ; Vis *et al.* 2001 ; Vinet, 2017), présentées ci-après, mobilisent également le concept de résilience.

b) L'enrichissement du concept de résilience par les Sciences Humaines et Sociales

Ce concept s'est diffusé dans une variété de contextes. La psychologie, l'économie et les disciplines s'intéressant aux risques et catastrophes, telles que la géographie, ont participé à faire évoluer les significations de ce concept. On peut noter, sans volonté d'exhaustivité, des recherches portant sur la résilience individuelle (Cyrulnik 2002) et sociétale (Tisseron, 2007, 2017) lors de traumatismes, sur la résilience socio-économique (Décamps, 2007 ; Richemond 2003 ; Lallau, 2014) et d'autres plus spécifiquement en géographie (Aschan-Leygonie, 2000), sur la résilience des territoires, des villes et des populations face aux risques et catastrophes (UNISDR/International Strategy for Disaster Reduction, 2004, 2015 ; IHDP/ International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change).

Le point commun de l'ensemble de ces travaux est le suivant : la résilience implique la préservation des éléments constitutifs du système et/ou de l'entité étudiés ayant connu un choc ainsi que le développement de mécanismes visant à être mieux préparé à anticiper, aborder, absorber, et à s'adapter et se remettre de future(s) épreuve(s). Mais des divergences sont également à noter.

Par rapport à l'écologie, les économistes donnent un sens voisin mais plus riche au concept de résilience. La résilience économique peut se définir soit comme « la capacité de maintenir la production d'un pays, d'une entreprise etc. proche de son potentiel malgré un choc » (Duval et Vogel, 2008), soit comme la capacité des entreprises, des organisations, des individus à rebondir, c'est-à-dire à mobiliser une « énergie résiliente, pour surmonter une épreuve » (Richemond, 2003). Il ressort nettement de ces deux définitions que, comme en écologie, l'économie résiliente peut revêtir deux sens différents : celui de la conservation intégrale du système économique (définition 1 supra, relative au retour à l'état d'équilibre initial) face à un choc ou celui du renouvellement du système (définition 2 supra, relative à la recherche d'un nouvel état d'équilibre). Le plus souvent, le premier sens est retenu car il est relativement aisé de calculer la vitesse et/ou la durée de retour de l'économie à l'état antérieur au choc (Dauphiné et Provitolo, 2007). En revanche, le deuxième sens nécessite d'identifier des critères de résilience, *a priori ou a posteriori* pour proposer une mesure de la résilience sous l'angle du renouvellement. Ceci n'est pas simple car signifie qu'il faut répondre à une question majeure : la résilience de quoi (d'une entreprise localisée, d'une filiale, de la maison mère), de qui (des salariés, des dirigeants, des administrateurs), face à quels choix (délocalisation, fermeture d'entreprise, licenciement) ?

Dans une démarche *a priori*, il s'agit d'accorder des capacités de résilience à des systèmes avant même qu'ils ne soient mis à l'épreuve. Il faut alors identifier des critères internes et externes, car le système est ouvert sur son environnement : par exemple, les politiques structurelles européennes qui contribuent à la résilience économique dans le cas d'un choc éventuel. Dans une démarche *a posteriori*, il s'agit de constater et d'identifier les facteurs ayant joué un rôle dans la mise en place d'une dynamique résiliente. Enfin, précisons que l'analyse de la résilience économique est traitée à différentes échelles : à l'échelle mésoscopique pour les stratégies déployées par les entreprises pour dépasser des situations critiques (Richemond, 2003), à l'échelle macroscopique lorsque les auteurs

étudient l'influence des politiques macro-économiques, notamment structurelles, sur l'évolution économique des pays face à des chocs (Duval et Vogel, 2008).

L'idée de résilience écosystémique est également partagée par les psychologues qui mènent leur recherche sur la résilience individuelle (Anthony, 1987 ; Greenbaum et Auerbach, 1992 ; Kaplan, 1999). Ces derniers cherchent alors à comprendre ce qui favorise l'adaptation et la résilience des personnes ayant subi des chocs psychologiques. Deux courants de recherche vont là encore s'opposer : pour les uns, la résilience individuelle relève de traits, de qualités personnels (Wright et Masten, 2005) tandis que pour les autres, la résilience individuelle dérive de facteurs externes à l'individu (les aspects familiaux, l'environnement social) (Schoon, 2006 ; Rutter, 2003). La résilience individuelle se construit alors dans sa relation avec autrui et grâce au soutien de « tuteurs de résilience⁵ », selon l'expression de B. Cyrulnik (2001) et et aussi dans ses pratiques personnelles en portant son attention sur les valeurs essentielles de l'humain, sur le beau, sur un ensemble d'éléments et d'environnements qui constituent les « pousses de la résilience » (Boudoukha, 2016). En ce sens, la résilience est un processus, elle se construit, voire se déconstruit et dans tous les cas elle n'est pas figée dans le temps. Elle est en effet définie comme « a dynamic process encompassing positive adaptation within the context of significant adversity » (Luthar *et al.*, 2000). Plus récemment, la résilience individuelle a été contestée et davantage pensée dans une dimension collective qui permet de combiner « les idées de force, de processus et de qualité, à la fois individuelle et groupale » (Tisseron, 2017).

Ces approches complémentaires qui combinent les idées de processus, de capacités individuelles et collectives, suscitent un intérêt notable dans les cindyniques (Kervern, 1995) **et plus particulièrement auprès de la communauté des géographes**. La résilience collective et sociétale, en tant que processus qui se construit au fil du temps, est ainsi au cœur des recherches et des professions s'intéressant à réduire les vulnérabilités des territoires, des populations et des acteurs en prise avec des risques, des catastrophes et des problématiques liées aux changements globaux. Face aux approches disciplinaires de la résilience, apparaît ainsi de façon informelle un nouveau concept, celui de résilience systémique.

1.1.3. La résilience systémique, le cadre retenu pour mener mes recherches sur les risques et catastrophes soudaines et imprévues

La résilience systémique s'applique à tous les systèmes, qu'il s'agisse de systèmes physiques, socio-économiques, territoriaux. Appliquée au domaine des risques et catastrophes soudaines et imprévues, la résilience systémique dépasse la seule idée de résistance au changement, de conservation des structures existantes, de retour à un état d'équilibre unique, pour préférer les notions :

- d'interactions entre les entités d'un système et entre ces entités et leur environnement,
- d'articulation des phénomènes d'échelle et de nature différentes,
- de flexibilité et réactivité des acteurs,

⁵ Les tuteurs de résilience sont des personnes qui vont jouer un rôle positif (par l'écoute, l'aide, les encouragements etc.) dans les trajectoires de vie de personnes entrant dans un processus de résilience.

- de mise en partage des modes de gestion des risques,
- de renouvellement du système, de réorganisation, de rebond, d'émergence de nouvelles trajectoires,
- de coexistence d'équilibres multiples⁶ variables selon les entités du système.

La résilience systémique est ainsi particulièrement adaptée à l'analyse des territoires urbains (villes, métropoles, mégapoles) aux prises avec des chocs soudains, imprévus et incertains, territoires soumis à des interactions de plus en plus variées et complexes entre les éléments, les enjeux et les événements, entre les échelles spatiales et temporelles, entre les niveaux d'organisation. Ces interactions confrontent à leur tour la gestion des risques à davantage d'incertitudes (Merad *et al.*, 2016).

Ces incertitudes peuvent être liées à la menace même (par exemple les changements climatiques et leurs impacts incertains), aux risques nouveaux (par exemple les cyberattaques) ou qui sont qualifiés de nouveau alors que c'est plus certainement leur perception qui a évolué (recherche du risque zéro qui, comme expliqué en introduction, est une utopie, recherche systématique de responsable(s)), aux réponses des territoires, des assureurs (confrontés au coût de l'indemnisation des victimes) et des populations, mais aussi aux conséquences incertaines de choix politiques.

Le paradigme de la résilience systémique est ainsi une réponse à l'incertitude et demande d'être plus réactif, plus flexible. Du côté des acteurs institutionnels et opérationnels, cette flexibilité a comme corollaire : i) le transfert de la gestion du risque et de l'évènement vers des acteurs intermédiaires : l'Etat français n'est plus le seul acteur de la prévention des risques et de la gestion des catastrophes, il délègue des actions à des échelons territoriaux inférieurs et est en même temps soumis à la législation européenne (par exemple avec la Directive Inondation), ii) la coordination des acteurs et des groupes d'acteurs à différentes échelles –européenne, transfrontalière, nationale, régionale, locale, individuelle-. Pour gérer les catastrophes, cette coordination est nécessaire. Ainsi, l'incendie du tunnel du Mont Blanc (mars 1999) est une catastrophe qui a révélé l'absence de concertation et de plan d'intervention commun entre les services d'intervention français et italien, ainsi que des procédures d'urgence et de mesures de sécurité qui n'étaient plus respectées depuis de nombreuses années.

La résilience systémique ouvre aussi la voie à la mise en partage des modes de gestion des risques non plus de façon sectorielle mais dans une approche transversale, afin de prendre en compte sur un même territoire la multiplicité des risques et la concurrence des enjeux (Pigeon *et al.*, 2018). Cette mise en partage des modes de gestion des risques amènera-t-elle à faire des choix ? Seront-ils faits à partir de l'entrée de l'aléa ou de l'entrée des territoires et des populations ? Seront-ils faits pour les risques les plus craints ou les plus fréquents ? Prenons un exemple. A Nice, suite à l'attaque terroriste sur la Promenade des Anglais le 14 juillet 2016, des décisions d'aménagement du territoire ont été prises afin d'éviter toute intrusion sur cet espace de loisirs fréquenté par la population. Comme le montre la photo 1, l'intrusion d'un véhicule est effectivement bloquée sur la voie terrestre

⁶ Walliser (2006) fait référence aux « d'états d'équilibre multiples dans un cas statique ou d'attracteurs suivant des bifurcations dans un cas dynamique ».

avec des piliers reliés entre eux par des câbles. Mais l'imagination dans le domaine des actes terroristes est malheureusement sans limites. Dans le cas d'une foule dense (regroupement pour une festivité), si la population devait évacuer pour fuir une menace (celle d'un attentat ou celle d'une submersion marine pour changer de registre), ces piliers, difficilement franchissables en cas de mouvement de masse, se transformeraient en obstacles pour la population avec un risque, comme dans les stades, de chutes et de piétinements. La vulnérabilité de la population se trouverait alors aggravée.

Photo 1 - Un dispositif anti-intrusion sur la Promenade des Anglais (© D. Provitolo, 2019)



Enfin, le renouvellement, la réorganisation ou les nouvelles trajectoires impliquent un changement de pensée exprimé par Clark (1986). La résilience nécessite pour l'humanité d'apprendre à vivre avec des systèmes naturellement dynamiques et de ne pas chercher une maîtrise du court terme, mais une dynamique résiliente sur le long terme. Cela implique de considérer les perturbations et les changements comme nécessaires à la dynamique du système et non comme des événements à éliminer. En cela, la résilience s'oppose à la gestion classique des risques centrée sur l'élimination ou la réduction de la menace. Pour l'action publique, il ne s'agit pas de reconstruire des stratégies qui soient le pendant de celles mises en place pour réduire les vulnérabilités, mais d'anticiper la crise en construisant les piliers de la résilience, en « inventant des futurs inédits, qui ne soient pas le seul retour aux conditions antérieures » (Lagadec, 2010). Mais quels futurs inédits inventer, concevoir pour minimiser les risques ? Il faut rester vigilant et garder à l'esprit que tout renouvellement, réorganisation ou nouvelles trajectoires ne sera pas *de facto* une réussite. Faisons ici un parallèle avec le domaine de l'emploi et l'émergence d'un nouveau modèle de travail pour réduire le risque de chômage : le modèle de la flexisécurité. Il s'agit d'un dispositif social autorisant une plus grande facilité de licenciement pour les entreprises (volet flexibilité) et des indemnités longues et importantes pour les salariés

licenciés (volet sécurité). Ce modèle mis en place au Danemark tendrait à être intégré en France dans la nouvelle loi travail. Avec le dispositif de flexisécurité, il est alors facile d'imaginer des entreprises flexibles car ayant la possibilité d'embaucher rapidement et de licencier tout aussi rapidement. Le bien-être de l'employé serait assuré car avec ses longues indemnités, il aurait ainsi plus de temps pour retrouver un travail et rebondir. Il est également possible d'avoir une autre analyse : imaginer des employés flexibles, non par choix, mais par adaptation à ce qui est imposé par l'entreprise dans un cadre réglementé par le code du travail. Il s'agit donc d'un choix politique. L'employé oscillerait entre phase d'emploi et phase de chômage, une situation que l'on pourrait qualifier d'emploi précaire. S'agit-il d'une phase de bien-être ? ou d'inquiétude ? L'avenir nous le dira. Mais la *Swiss Reinsurance Company* alerte aussi sur le fait que le manque de sommeil (pour lequel l'inquiétude est un facteur déclenchant) pourrait coûter des milliards de dollars au secteur de l'assurance sur le long terme.

1.2. La résilience systémique se construit sur un continuum temporel

En étant appréhendée comme un processus, la résilience des systèmes (territoires, villes, populations) aux risques et catastrophes ne se limite plus uniquement à l'urgence de l'intervention, à la reconstruction après un choc, un trauma (terme employé par les psychologues qui travaillent sur l'être humain, à l'échelle de l'individu ou de la population). Elle se met également en place avant l'évènement et après le choc ou les pressions de l'environnement. La résilience peut ainsi être traitée comme un cycle dont les phases de choc et de reconstruction, ou plus exactement d'analyse des chocs et de reconstruction, vont alimenter la phase de résilience préventive. Etabli sur ce continuum temporel, le concept de résilience permet ainsi d'aborder le risque par « l'adaptation des enjeux, l'absorption de l'aléa, la récupération du territoire après la crise » (Barroca, 2014).

1.2.1. La résilience après le moment du choc

Initialement, la communauté scientifique mobilisait la résilience dans le domaine des catastrophes et le « moment de la résilience » était situé après le choc : « Students of disaster tend to situate the concept after the shock » (Comfort *et al.*, 2010). Les pratiques consistaient donc (i) à faire un état des lieux de l'impact d'un évènement et de sa gestion par les acteurs opérationnels, institutionnels et par les populations, (ii) afin de réaliser des RETours d'EXpérience (RETEX) permettant d'identifier les fonctionnements et dysfonctionnements puis (iii) proposer des actions pour que le territoire retrouve rapidement un état de marche dite normale. P. Pigeon et Rebotier (2016) ont révélé tout l'intérêt d'analyser les rapports d'expérience et les retours d'expérience pour mener une approche plus réflexive sur le risque de catastrophe et mettre en lumière les enseignements tirés (ou écartés) des politiques publiques en matière de production et de gestion de situations à risque.

Vue comme un processus, la résilience se crée, évolue, n'est pas figée dans le temps, ce qui génère la possibilité de lui associer des capacités.

Ainsi, après le choc, la résilience d'un territoire permet de révéler :

- les capacités à gérer la post-crise et le retour à la normale (par exemple évacuer et éliminer les déchets produits à la suite de catastrophes naturelles pour des questions de santé publique et de circulation des moyens de secours et des

populations, assurer le fonctionnement du service de gestion des déchets en mode exceptionnel) (Durand *et al.*, 2015 ; Beraud *et al.*, 2012),

- les capacités à récupérer et à (se) reconstruire ici ou ailleurs. Ces capacités mobilisent des ressources internes et/ou externes au système, qu'il s'agisse d'un individu, d'une institution, d'un quartier, d'une ville, d'un pays etc.,
- les capacités d'un système à maintenir son intégrité et à revenir à un état qui est celui de l'équilibre antérieur (le système se restaure, par exemple, avec des pratiques de reconstruction à l'identique) ou au contraire à rebondir vers un nouvel état (par exemple des pratiques de reconstruction dépassant l'idée de combattre, faire face à l'eau, et préférant innover en matière d'architecture avec des maisons flottantes),
- les capacités de mémoire et d'apprentissage au sens d'apprendre des leçons du passé afin de se renforcer, de transformer le système et de rebondir.

Ce concept, si tant est que l'on puisse le rendre opérationnel, peut donc être requis pour appréhender la dynamique du système, et principalement sa capacité à trouver de nouvelles trajectoires pour s'adapter à une perturbation.

Les RETEX et le déploiement d'outils réglementaires et législatifs, les prises de conscience politiques et citoyennes de la complexité des catastrophes urbaines (November *et al.* 2011) vont participer à faire évoluer, modifier le « moment de résilience » : ce dernier n'est plus restreint à l'après-choc, mais s'ouvre à la temporalité de l'avant-événement.

1.2.2. La résilience avant le moment du choc,

Positionner le moment de la résilience dans la temporalité de l'avant-événement, revient à s'intéresser aux processus qui participent à construire des territoires et des sociétés résilientes et non plus à rechercher l'état d'équilibre du système. La résilience se construit donc sur le long terme, elle consiste à rechercher de nouvelles trajectoires, un renouvellement du système, que ce dernier ait subi une catastrophe bien réelle ou soit exposé à un risque potentiel. Avant le choc, la résilience, c'est se préparer... à anticiper et à faire face aux événements connus et à s'adapter aux phénomènes moins connus, moins prévisibles. La connaissance du risque dans ses différentes dimensions et la projection vers le futur sont alors essentielles.

Ainsi, la résilience fait référence :

- aux capacités d'anticipation de scénarios de menaces prévisibles ou au contraire inconcevables, afin bien évidemment d'assurer les capacités de fonctionnement des systèmes et des organisations, et ce même en « mode dégradé » (par exemple réalisation d'exercices de crise type Richter pour gérer un tremblement de terre, ou type intrusion massive pour gérer un acte terroriste),
- aux capacités d'adaptation en mettant en place des stratégies visant à se préparer aux phénomènes connus et moins connus, moins documentés. Il s'agit par exemple de proposer des modes d'adaptation aux nouvelles conditions climatiques afin de réduire la vulnérabilité future (modification des pratiques d'usage du sol, densification de la végétation en ville). On voit ainsi apparaître aux Pays-Bas des projets de maisons flottantes pour s'adapter à l'environnement et vivre sur l'eau,

avec l'eau). L'adaptation peut également être comportementale et passer par des dispositifs variés (information et préparation des populations, pré-organisation des habitants et des acteurs) qui agissent sur les capacités d'apprentissage,

- aux capacités d'apprentissage pour pouvoir faire face à un événement (par exemple développer des pratiques de culture du risque afin d'adopter des comportements adaptés à la situation et éviter par exemple de conduire sur une route inondée, de se rendre dans les sous-sols des résidences pour mettre à l'abri les véhicules ou encore de sortir en pleine tempête pour bâcher un toit qui vient de s'envoler) (Maif, Catastrophes naturelles, les bons réflexes).

Avant la catastrophe, les mesures déployées pour améliorer la résilience ne viseront pas à s'opposer à l'aléa mais à en réduire les impacts en anticipant les menaces actuelles et futures, en amenant les politiques à reconsidérer les modes de développement urbain et l'aménagement du territoire, en reconsidérant les pratiques de consommation d'espace et de ressources (Quenault *et al.*, 2011), en apprenant des événements passés.

1.2.3. La résilience s'exprime durant le moment du choc

« In this view, resilient organizations recognize, adapt to, and absorb variations, changes, disturbances, disruptions and surprises » (Hollnagel, Woods and Leveson, 2006)

Ce moment de la résilience « à faire face » mobilise les capacités des territoires et des sociétés :

- à résister au choc ou à une pression continue (par exemple, renforcer la résistance matérielle du bâti, construire des ouvrages de défense pour lutter contre les inondations, va limiter l'endommagement matériel et, par effet induit, les perturbations fonctionnelles qui auraient pu résulter de cet endommagement ; ces pratiques de résistance font l'objet de nombreux débats dans la communauté, nous y reviendrons),
- à y réagir (par exemple faire face à l'évènement institutionnellement, collectivement, individuellement, adapter les comportements humains et les déplacements),
- à maintenir les services (par exemple maintenir la fonctionnalité des services d'intervention d'urgence, des services des infrastructures critiques)
- à répondre à l'urgence (par exemple assurer la qualité et la rapidité de l'intervention publique, proposer des zones refuges qui soient accessibles et adaptées à la menace).

La diversité « des moments » de la résilience fait que les acceptions ne sont pas toujours compatibles et suscitent des débats parfois virulents au sein des communautés scientifiques. Par exemple, il est possible de souligner la contradiction entre résilience et résistance (Provitolo *et al.*, 2017). Synonymes pour certains, qui amalgament résistance et persistance en sous-entendant que la persistance renvoie à la force et à la dureté, intimement liées pour ceux qui considèrent que la résistance donne le temps au système de s'adapter ; ces deux notions sont rigoureusement opposées chez ceux pour qui la capacité d'adaptation suppose la souplesse et la plasticité, alors que la résistance implique l'opposition et la rigidité (Adger, 2000). L'opposition entre résistance et adaptation a de plus été mise en lumière par les cindyniciens pour qui une stratégie d'adaptation est

antinomique avec une stratégie de résistance structurelle. P. Pigeon (2005, 2012) et S. Revet (2009) ont en effet montré que ces dispositifs structurels, censés réduire les situations de vulnérabilité en confinant les aléas, contribuent souvent au contraire à créer, voire renforcer les vulnérabilités des populations. Plus les mesures de lutte structurelle contre les inondations sont développées, plus le potentiel d'endommagement croît car la protection favorise, voire autorise (via des outils règlementaires tels que les Programmes d'Actions de Prévention des Inondations - PAPI) les constructions en zone inondable, constructions qui vont à leur tour nécessiter plus de mesures structurelles pour protéger les habitants. L'exemple de l'évolution urbaine de La Nouvelle Orléans entre 1965 et aujourd'hui illustre particulièrement bien cette contradiction. « Il semble évident aujourd'hui que le cyclone Katrina a mis un terme à 40 ans d'étalement urbain encouragé par des politiques publiques de protection structurelle profondément inadaptées à la dynamique d'un littoral où la transgression marine qui accompagne le changement climatique est particulièrement rapide » (Overpeck et Weiss 2009).

Il est également possible d'adopter une position médiane, que je partage. En effet, si certaines formes d'atténuation de l'aléa permettent d'accroître la résilience, d'autres peuvent au contraire « miner » la résilience sur le long terme (Comfort *et al.*, 2010 ; Burby 2006), tout dépendant de l'intensité du risque, des types d'aléas et de menaces (récurrents et anticipés *versus* exceptionnels et non anticipés) et des incertitudes associées. Par exemple, les structures collectives de protection, telles les digues, peuvent participer à la résilience d'un territoire pour un type de risque et une intensité donnée, en limitant les dommages et en contribuant de fait à un redressement plus rapide du système. Mais il faut garder en mémoire que ces ouvrages de défense sont vulnérables lors d'événements extrêmes⁷ (Photo 2) ; ils ne fournissent pas une protection absolue et donnent parfois à la population un « faux sentiment » de sécurité (Birkland, 2010). Ils nécessitent ainsi d'adapter l'architecture des bâtiments en arrière de ces ouvrages en évitant par exemple tout simplement la construction de maison de plain-pied.

Photo 2 - Ile de Ré, la reconstruction des digues après le passage de la tempête Xynthia, Septembre 2010 (©D. Provitolo)



⁷ On définit un événement extrême comme rare en ampleur, en fréquence et en durée pour un système donné, au cours d'une période déterminée

Conclusion

Une idée commune à l'ensemble de ces définitions ressort cependant : la remise en état, la récupération d'un système (on parle souvent de socio-éco système dans la littérature scientifique) passe par sa capacité d'absorption et d'adaptation aux chocs, et ce particulièrement dans un environnement en mutation. **Appliquée au domaine des risques et catastrophes, la résilience suppose alors de se préparer, d'anticiper les risques de catastrophes, de s'y adapter, de faire face aux désastres éventuels et de s'en remettre. La résilience ne concerne donc pas la seule phase de reconstruction après un évènement, elle se déroule sur une temporalité en 3 temps : l'avant-, le pendant- et l'après- catastrophe, celle-ci pouvant être brutale (séisme, tsunami, accident technologique) ou continue (érosion, sécheresse).** La résilience devient ainsi réactive et proactive car il y a non seulement la volonté politique de réagir après une perturbation mais aussi d'anticiper un risque de catastrophe, prévisible ou incertain, d'intégrer de nouveaux facteurs, de déployer de nouvelles stratégies pour en prévenir les désastres.

Chapitre 2

Les concepts de résilience et de vulnérabilité : opposition, imbrication ou continuum ?

Le concept de résilience, quoique polysémique, s'est imposé dans le domaine de la gestion des catastrophes ; il tend à supplanter celui de vulnérabilité (Quenault, 2013). Or, la plupart des définitions de la résilience ont en commun d'établir des recoupements avec celles de la vulnérabilité de sorte que ces deux concepts semblent ne pouvoir se comprendre que l'un par rapport à l'autre (Van der Leeuw et Aschan-Leygonie, 2001). Les différents travaux présentent le plus souvent la vulnérabilité selon un aspect négatif et la résilience selon un aspect positif (Provitolo, 2012). La mise en exergue du caractère « positif » de la résilience s'explique en grande partie par la recherche d'applicabilité : tandis que la vulnérabilité sanctionne une faiblesse, une incapacité, la résilience apparaît comme la propriété désirable d'un système vers laquelle la gestion devrait tendre (Klein *et al.*, 2003). On glisse alors vers une opposition systématique entre les deux concepts. Pourtant, cette lecture binaire du couple vulnérabilité/résilience n'est pas aussi tranchée qu'elle voudrait le laisser paraître. Pour amener des éléments de réponse, il faut faire un détour sur les sens accordés au concept de vulnérabilité.

2.1. Une ou des vulnérabilités ?

Il ne s'agit pas ici de réaliser un état de l'art sur le concept de vulnérabilité et sur les travaux menés à l'échelle nationale ou internationale. Un ouvrage entier n'y suffirait pas. Le lecteur peut notamment se reporter aux références de Becerra et Peltier, 2009 ; Cutter *et al.* 2008 ; Füssel, 2007, 2009 ; Gaimard *et al.* 2018; Magnan, 2009 ; O'Brien *et al.* 2007 ; Villagran, 2006.

Je brosse ici trois approches complémentaires d'analyse de la vulnérabilité, qui sont chacune rattachées à des paradigmes différents et qui m'ont permis de réfléchir aux relations pouvant être établies entre vulnérabilité et résilience.

Quelles sont ces approches complémentaires ? L'une, la plus ancienne, analyse la vulnérabilité à partir d'une mesure de l'endommagement réel ou potentiel des éléments menacés par une catastrophe. L'autre s'intéresse à la vulnérabilité sous l'angle des capacités de réponses de la société face à une perturbation. Enfin, la troisième, la plus récente, porte son attention sur les enjeux territoriaux. Dans le premier cas, la vulnérabilité est biophysique, dans les second et troisième cas, la vulnérabilité est dite sociale (Wisner *et al.* 1976) ou territoriale (Bonnet, 2002).

2.1.1. La vulnérabilité biophysique

La vulnérabilité biophysique englobe des notions développées dans les sciences physiques et ingénieriales à partir des années 1950 : fragilité, susceptibilité, sensibilité, dommages. Elle mesure l'impact physique d'un aléa sur des bâtiments, des réseaux, des infrastructures, des populations, appelés « enjeux » (d'où le préfixe bio-, destiné à intégrer les composantes non inertes). Elle peut d'ailleurs, selon les auteurs, désigner les dommages effectivement subis ou les dommages attendus en cas d'occurrence de l'aléa. Dans les deux cas, ces dommages sont évalués de façon absolue ou relative.

La vulnérabilité biophysique dépend essentiellement de trois facteurs : l'exposition des enjeux à l'aléa, leur résistance et leur sensibilité (Adger, 2006). L'exposition, définie par la proximité entre un aléa et des enjeux, permet de tenir compte du rôle joué par la proximité dans les mécanismes d'endommagement (Heyman *et al.*, 1991). Certains auteurs entendent d'ailleurs la vulnérabilité comme uniquement la mesure du degré d'exposition (Alexander, 1993). Dans ce cas, la cartographie des zones à risques s'effectue par la superposition de la carte de l'extension spatiale de l'aléa et de celle de la répartition des enjeux (Pigeon, 1995). Elle appelle des solutions reposant sur l'édification de barrières et le contrôle de l'occupation des zones à risque par un zonage réglementaire. La résistance est la possibilité d'un système d'absorber ou contrecarrer les effets d'une perturbation sans subir de dégâts. Longtemps réduite à la résistance physique du bâti et des infrastructures de protection (quand une inondation se heurte à une digue), la notion de résistance a ensuite été étendue à la résistance physique et/ou mentale d'un individu ou d'un groupe. Cette acception a conduit les gestionnaires à développer une série de solutions techniques afin d'augmenter cette résistance. Des normes de construction, telles que les normes parasismiques ou les normes d'étanchéisation de certains matériaux, ont ainsi été, peu à peu, rendues obligatoires dans les pays développés. De la résistance découle la sensibilité du système. La sensibilité est le degré d'endommagement que des personnes et des lieux peuvent connaître (Adger, 2006). Elle est fonction de la nature, l'intensité et la fréquence de l'aléa. Elle est donc spécifique à l'aléa : le séisme de Kobé en 1995 a par exemple montré que les vieilles maisons en bois, dont le toit avait été alourdi pour résister aux cyclones, avaient été, de ce fait, rendues plus sensibles aux séismes (Ménoni, 2001).

La vulnérabilité biophysique est donc basée sur l'estimation des dommages à partir des pertes. Ainsi, pour chaque enjeu identifié, une évaluation des dommages est établie à partir des caractéristiques de l'aléa (nature, intensité voire probabilité d'occurrence). Les enjeux sont variés. Dans une modélisation conceptuelle du domaine des risques et catastrophes (ANR CO-SMA-GEMS⁸), j'ai proposé, en m'appuyant sur les travaux de nos prédécesseurs, de distinguer les enjeux humains, matériels, économiques, patrimoniaux, organisationnels, de ceux liés au fonctionnement des écosystèmes (Provitolo, Dubos-Paillard et Müller, 2014). Cette palette des enjeux varie suivant la nature de l'aléa. Ainsi, pour les risques du vivant l'habitat n'est pas un enjeu, tandis que c'est un enjeu primordial lors d'un séisme. Pour chaque enjeu reconnu, une évaluation des dommages est établie en fonction des niveaux d'aléa. Ces derniers sont estimés en termes de pertes humaines, financières, etc. Rares sont les études s'intéressant aux gains pouvant être produits, sur le long terme, par une catastrophe. Il s'agit là d'une forme de résilience, de capacité à rebondir. L'impact négatif à court terme du tremblement de terre de Kobé en 1995 sur la production économique a par exemple été suivi d'un rebond avec une accélération des dépenses de reconstruction. Une évolution similaire a pu être notée après la catastrophe de Fukushima (mars 2011, Japon).

La démarche d'analyse de la vulnérabilité biophysique est analytique car les enjeux peuvent être décomposés plus ou moins finement. Par exemple, au niveau des biens économiques, il est possible de calculer les dommages pour l'agriculture, l'industrie, et les

⁸ CO-SMA-GEMS = Corpus d'Ontologie pour les Systèmes Multi-Agents en Géographie, Economie, Marketing et Sociologie.

services, ou d'être encore plus précis en distinguant différentes cultures et formes d'élevage au sein du secteur agricole.

Depuis une quinzaine/vingtaine d'années, cette approche de la vulnérabilité est considérée comme trop analytique et restrictive, notamment car elle intègre peu les relations et effets de dominos entre les enjeux et les capacités de réponse des sociétés face aux risques et catastrophes. Ainsi, d'autres approches proposent de considérer la vulnérabilité synthétique, c'est-à-dire la fragilité d'un système dans son ensemble et ses capacités de réponse à une crise potentielle. Ces capacités sont également mobilisées pour opérationnaliser la résilience. Ces approches initialement basées sur l'analyse de la vulnérabilité sociale se sont enrichies plus récemment avec l'analyse de la vulnérabilité territoriale, analyse notamment développée dans le cadre du Programme Andin de Formation et de Recherche sur la Vulnérabilité et les Risques en milieu urbain (PACIVUR).

2.1.2. La vulnérabilité sociale

La vulnérabilité sociale vient compléter l'approche précédente. Elle permet d'appréhender la capacité d'endommagement en termes de réponses, c'est-à-dire d'adaptation active des enjeux au risque. Elle déplace l'attention de l'aléa, facteur externe de risque, vers la capacité à faire face à la menace et à l'impact du processus dommageable.

Alors que la vulnérabilité biophysique est d'abord envisagée comme un état, la vulnérabilité sociale est définie comme une qualité, une propriété de l'enjeu qui explique cet état, qui existe dans un système avant même qu'il ne soit confronté à un aléa (Adger, 1999 ; Adger et Kelly, 1999). En ce sens, la vulnérabilité sociale est inhérente au système (Brooks, 2003) et ne dépendrait ni de l'exposition à la perturbation ni de son intensité.

Elle revêt, au départ en tout cas, une valeur heuristique : il s'agit moins de mesurer le potentiel de dommages que de révéler les facteurs qui créent ce potentiel, en insistant sur des facteurs endogènes de risques non spécifiques à l'aléa. Ces facteurs sont de natures diverses : politiques, institutionnelles, économiques, socio-culturelles, psychologiques et cognitives (Fabiani et Theys, 1997).

Selon les auteurs, la vulnérabilité sociale est davantage étudiée sous l'angle des niveaux de ressources -revenus, capitaux, réseaux sociaux-, des niveaux d'accessibilité aux crédits et à l'information (Cross, 2001 ; Wisner, 1998 ; Wisner *et al.*, 2004), des facteurs culturels et institutionnels (Bolay, 1994 ; Ouallet, 2009 ; Thouret et d'Ercole, 1996) et enfin des facteurs techniques et organisationnels (Leveson, 2006). Il s'agit donc d'une démarche qualitative qui porte sur l'identification de l'hétérogénéité des facteurs de vulnérabilité intrinsèque au système social étudié. Ces facteurs concernent tout ce qui permet à un individu, un groupe, une institution ou une société d'augmenter ou diminuer sa capacité à anticiper l'évènement, à y faire face, à le gérer (Allen, 2003) et, pour certains auteurs, à s'en remettre. Autant de capacités constitutives du domaine de la résilience.

Cependant, on peut reprocher à ce cadre de prendre peu en compte le contexte géographique et le rôle des territoires. Les analyses de vulnérabilité sociale intègrent peu « les interactions qui s'effectuent entre les populations en situation de vulnérabilité et le territoire qu'elles occupent » (Gaimard *et al.*, 2018).

2.1.3. La vulnérabilité territoriale

Pour remédier à cette limite, de nouveaux cadres d'analyse, tels que la vulnérabilité locale (Cutter *et al.*, 2003, 2004) et la vulnérabilité territoriale (Bonnet, 2002 ; D'Ercole et Metzger, 2009) ont été proposés. Ces derniers permettent d'intégrer la dimension spatiale des différentes formes de vulnérabilités. La vulnérabilité locale est définie à partir des vulnérabilités biophysiques et sociales. Elle recombine des savoirs sectoriels. La vulnérabilité territoriale en revanche est plus originale, elle est un concept récent, développé par la géographie française. Le concept de territoire n'existe pas en effet, en tout cas en tant que tel, dans le monde anglo-saxon. Le terme de territoire s'est imposé au cours des années 2000 dans les politiques publiques françaises, le territoire étant ici synonyme de local, un « gage de l'adaptation de ces politiques aux contextes et aux enjeux locaux, censé leur assurer la lisibilité démocratique et l'efficacité sociale et économique » (Ghiotti, 2006).

Les géographes français ont montré que la spatialisation des risques c'est-à-dire la délimitation d'espaces dits à risques, est au fondement de leur gestion (November, 2006). Cette délimitation, qui donne naissance aux périmètres de gestion et aux zonages, s'appuie certes sur la connaissance scientifique, mais est aussi et surtout une construction politique, source de conflits qui peut être analysée grâce au concept de territoire (Pigeon, 2005).

Les géographes s'intéressent aussi aux conséquences de la définition d'un risque pour un espace donné. Ils soulignent par exemple que le risque peut « créer de nouveaux référentiels spatiaux, de nouvelles formes d'ancrage territorial auxquelles ne correspondent plus les cadres administratifs de référence » (Beucher et Reghezza, 2005). Qualifier un espace à risque n'est pas neutre : l'identité, l'image de cet espace en sont forcément modifiées. Le risque contribue par conséquent à produire du territoire, entendu cette fois comme un espace géographique approprié.

Certains chercheurs vont beaucoup plus loin et avancent l'hypothèse que l'espace est « une forme susceptible en elle-même de causer ruptures et perturbations » (Novembre, 1994). Il existe en particulier des configurations spatiales capables de produire, d'aggraver ou d'atténuer les risques (Reghezza, 2009). Quelle que soit la nature de l'aléa d'origine, la dynamique de risque est spécifique au territoire concerné. On peut ainsi parler de risques urbains ou métropolitains, signifiant par là qu'un même aléa (par exemple un aléa naturel ou technologique) aura des impacts spécifiques selon l'espace dans lequel il survient, parce que chaque type d'espace a une vulnérabilité propre (Reghezza, 2006). Étudier la vulnérabilité territoriale passe alors par l'identification des espaces susceptibles de subir des dommages importants mais aussi des lieux à partir desquels pourront se propager les perturbations au sein d'un territoire (D'Ercole et Metzger, 2009) ainsi que des organisations spatiales qui empêcheront cette propagation (Cutter *et al.*, 2000).

La vulnérabilité territoriale est donc davantage liée aux enjeux, stratégiques et non stratégiques, et donc au fonctionnement interne du territoire, qu'à l'occurrence d'un aléa. Comme le précisent R. D'Ercole et P. Metzger (2003), ces enjeux varient selon que l'on se trouve en situation normale, de crise ou de développement. Ces auteurs distinguent ainsi six formes de vulnérabilité : les faiblesses intrinsèques des enjeux, la dépendance vis-à-vis de systèmes autres que celui dans lequel s'intègre un enjeu donné, l'exposition aux aléas et la susceptibilité d'endommagement, la capacité de contrôle des enjeux, les alternatives de

fonctionnement, la capacité de gestion des situations de crise. Là encore on voit apparaître des recoupements avec le concept de résilience.

La vulnérabilité territoriale est donc un concept séduisant mais ambigu. L'approche territoriale permet surtout d'adopter une démarche synthétique qui dépasse la lecture dichotomique faisant du risque un élément extérieur au territoire de sorte qu'il « ne s'agit plus de gérer un risque, une fois qu'il a été identifié, *sur* un territoire, mais de gérer *un* territoire en intégrant l'existence d'un ou de plusieurs risques » (Beucher *et al.*, 2008).

Partir du territoire suppose aussi de rejeter l'approche segmentée des risques, qui disjoint l'aléa, la vulnérabilité et les différentes composantes de cette dernière (Pigeon, 2005). Le territoire étant considéré comme un système, les travaux sur la vulnérabilité territoriale rejoignent ceux sur la vulnérabilité systémique, recherches qui s'intéressent notamment aux effets de dominos et d'interdépendance (Provitolo, 2002).

L'approche systémique de la vulnérabilité a permis de montrer que celle-ci possède une double dimension : elle est à la fois endogène au système (en tant qu'état de fragilité) et fonction de sa capacité à connaître une perturbation, l'absorber, s'y adapter et retrouver un fonctionnement satisfaisant (Dauphiné et Provitolo, 2013).

Le rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC/IPCC) s'inscrit dans cette voie en définissant la vulnérabilité comme « the degree to which a system is susceptible to, and unable to cope with adverse effects of climate change, including climate variability extremes. Vulnerability is a function of the character, the magnitude, and rate of climate change and variation to which a system is exposed, its sensitivity, and its adaptive capacity » (Carter *et al.*, 1994).

Par conséquent, de nombreuses définitions ne distinguent pas clairement la vulnérabilité de la résilience dans la mesure où, étudier la vulnérabilité d'une population ou d'un système, en tant que capacité à faire face, c'est aussi analyser ses capacités à se remettre d'une situation, à récupérer, à innover pour se réorganiser, à s'adapter, c'est-à-dire, *in fine*, sa résilience. Des zones de chevauchement apparaissent donc entre les concepts de vulnérabilité et résilience et leurs déterminants (exposition, résistance, sensibilité, adaptation etc.). Il semble ainsi y avoir un continuum entre les deux notions, sans que l'on parvienne pour autant à les positionner clairement les unes par rapport aux autres.

2.2. Le couple vulnérabilité/résilience

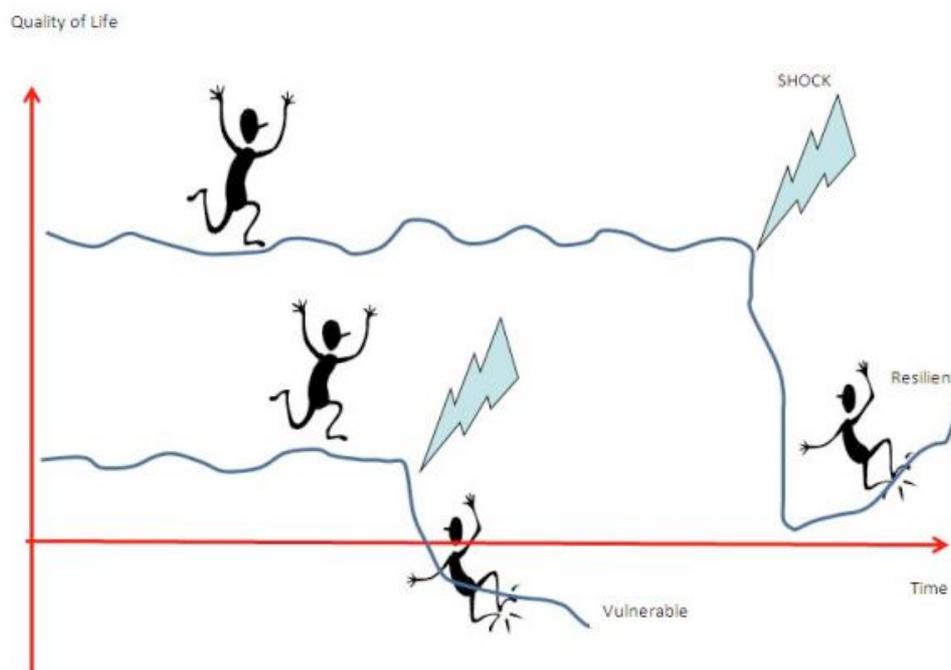
Selon les auteurs, la résilience peut être considérée comme i) un antonyme de la vulnérabilité, ii) une composante de la vulnérabilité, et enfin iii) un continuum de la vulnérabilité.

2.2.1. La résilience comme antonyme de la vulnérabilité

La première façon d'aborder le couple vulnérabilité/résilience est de les opposer comme les deux faces d'une même médaille (Folke, 2006). Ainsi, le groupe *Resilience Alliance*, dont le but est de stimuler une recherche pluridisciplinaire sur la résilience et d'informer les décideurs internationaux, la définit comme le « *flip-side* » de la vulnérabilité. La vulnérabilité est alors présentée selon un aspect négatif et la résilience selon un aspect positif (Fig. 3). Or les explications ne sont pas aussi binaires. Ainsi, observer la résilience

sur un territoire à une échelle de temps et d'espace donnée, ne signifie pas qu'elle soit effective à d'autres échelles spatiales ou temporelles. Comme le font remarquer C. Villar et B. Guézo (2017), en cas de catastrophe naturelle, des mesures de relogement prises dans l'urgence, efficaces à court terme, peuvent par la suite s'avérer insuffisantes voire devenir contre-productives si elles se pérennisent. De même, des mesures collectives de réduction de la vulnérabilité des populations avant ou après la catastrophe peuvent entraver la mise en place de mesures individuelles impliquant la population dans la gestion du risque. Ce constat participe aujourd'hui de la remise en question du régime français d'indemnisation des catastrophes naturelles, régime basé sur la solidarité nationale.

Figure 3 - La résilience vue comme un antonyme de la vulnérabilité (Source : M. Reghezza, Ecole d'Eté – Catane - Juillet 2016, Labex Dynamite)



Opposer vulnérabilité et résilience est une conséquence logique de la définition de la résilience comme capacité d'adaptation à un choc et de celle de la vulnérabilité comme sensibilité à l'endommagement. Si un enjeu ou un système subit un dommage, c'est qu'il est vulnérable. Or, plus il subit de dommages, plus la probabilité qu'il se désorganise et s'effondre est grande et plus il lui sera difficile de se relever. Ainsi, plus le système est vulnérable (au sens de sensible à l'endommagement), moins il est résilient.

L'opposition entre vulnérabilité et résilience est également patente si l'on considère non plus l'impact de la perturbation mais l'incapacité à y faire face. Le système peut s'effondrer car il ne peut ni anticiper, ni s'adapter à des menaces variées. Il est encore moins à même de résister et d'absorber l'une d'entre elles. On retrouve en creux toutes les déclinaisons de la résilience présentées précédemment.

L'opposition systématique entre vulnérabilité et résilience conduit alors à conclure que diminuer la vulnérabilité revient à augmenter mécaniquement la résilience. R. Klein *et al.* (2003) définissent par exemple cinq leviers pour améliorer les capacités d'adaptation au

changement climatique (et donc des leviers pour la résilience), qui sont en réalité autant d'actions de réduction de la vulnérabilité sociale et biophysique : augmenter la capacité de résistance des bâtiments ; augmenter la flexibilité des systèmes anthropiques potentiellement vulnérables en modifiant la gestion, les usages et les localisations ; développer l'adaptabilité des systèmes naturels ; inverser les dynamiques qui tendent à accroître la vulnérabilité (en particulier l'occupation humaine des zones à risques) ; améliorer la conscience du risque et la préparation des populations, notamment par une information sur les dangers.

Pourtant, l'expérience montre que l'on peut être dans le même temps vulnérable à un choc et résilient. Si je prends l'exemple des villes, on s'aperçoit que leur potentiel d'endommagement est immense, certains auteurs affirmant même qu'il n'a jamais été aussi grand (Mitchell, 1999). Leur vulnérabilité est donc forte, tant du fait de leur exposition à des menaces variées que de leur fragilité propre. Pourtant, les villes offrent dans le même temps une grande résilience aux catastrophes puisque, comme le soulignent L. J. Vale et T. J. Campanella (2005), « although cities have been destroyed throughout history – sacked, shaken, burned, bombed, flooded, starved, irradiated, and poisoned – they have, in almost every case, risen again like a phoenix. [...] Cities are among humankind's most durable artifacts ».

2.2.2. La résilience comme composante de la vulnérabilité

Les liens entre vulnérabilité et résilience sont par conséquent loin d'être aussi tranchés que l'image du « *flip-side* » ne le laisse entendre. La littérature scientifique reste d'ailleurs souvent équivoque sur le sujet. C. Folke *et al.* (2002) définissent par exemple la résilience comme le pendant (*flip-side*) de la vulnérabilité, mais dans la même page, ils en font l'un des trois éléments définissant la vulnérabilité, avec la sensibilité et l'exposition. S. Cutter *et al.* (2003) définissent la vulnérabilité sociale comme la possibilité pour un groupe de subir des pertes ou comme sa résilience face à un risque (perception du risque, prévention, expérience...) : « social vulnerability is partially a product of social inequalities, those social factors and forces that create the susceptibility of various groups to harm, and in turn affect their ability to respond, and bounce back (resilience) after the disaster ».

Par conséquent, la capacité de résilience devient une composante de la vulnérabilité, entendue comme capacité à faire face avec toutefois des degrés d'inclusion variables. Pour B. Quenault (2014), certains auteurs ont représenté ces différents concepts comme étant encadrés ou emboîtés au sein du concept plus large de vulnérabilité (Turner *et al.*, 2003 ; Gallopin, 2006), d'autres ont souligné que la résilience, étant selon eux totalement incluse dans la capacité adaptative, constituait l'une des composantes de la vulnérabilité (Adger, 2006 ; Birkmann, 2006 ; Cutter *et al.*, 2008).

Il semble ainsi y avoir un continuum entre les deux concepts, sans que l'on parvienne pour autant à les positionner clairement l'un par rapport à l'autre.

2.2.3. La vulnérabilité et la résilience vues comme un continuum

La complexité des liens entre résilience et vulnérabilité est indéniable : si les deux concepts ne sont pas indépendants, ils n'en demeurent pas moins distincts. J'ai souhaité montrer que leurs relations ne peuvent se réduire à une opposition stricte (telle que préconisée par le groupe de recherche *Resilience Alliance*) ou même à une inclusion (Pelling,

2003).

J'ai proposé de considérer leurs relations comme un *continuum*, de sorte que la vulnérabilité peut par exemple être traversée et modifiée par la résilience (Provitolo, 2012 ; Provitolo et Reghezza, 2015).

Mon objectif était de :

- mettre en question l'opposition entre d'un côté, les systèmes vulnérables, et de l'autre, les systèmes résilients,
- montrer que la résilience et la vulnérabilité peuvent être contingentes, et se construisent pour et à différentes échelles,
- souligner que la résilience n'est pas positive en soi : elle peut avoir des effets négatifs à d'autres échelles et niveaux,
- éviter de diviser l'humanité et les individus en deux catégories : les forts qui bénéficieraient de la qualité de résilience, les faibles qui n'en seraient pas pourvus.

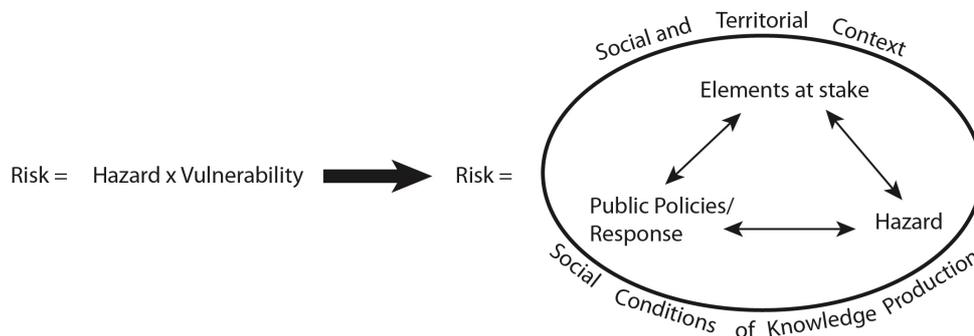
Pour rendre compte de ce continuum, j'ai proposé la notion de « vulnérabilité résilience » (Provitolo, 2013) (il s'agit d'un néologisme que j'ai volontairement créé) et un cadre conceptuel construit dans une approche systémique pour l'analyser (Fig. 5).

Par ce néologisme, la résilience est directement connectée à la vulnérabilité, mais pas forcément sous le mode de l'opposition. C'est bien l'idée de *continuum* que je mets en avant. **La notion de « vulnérabilité résilience » se propose en effet de traduire 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 les échelles (spatiales et temporelles) auxquelles on étudie le système, selon la nature du risque et son intensité.** En proposant d'analyser la « vulnérabilité résilience » comme un continuum, nous évitons la traditionnelle césure entre les fragiles d'un côté et les résistants et les résilients de l'autre.

La « vulnérabilité résilience » ne nie pas la fragilité du système étudié, mais elle propose d'identifier les potentialités, capacités et réactions qui vont lui permettre, malgré cette fragilité, de faire face aux événements mineurs comme extrêmes, aux chocs soudains ou aux perturbations continues et de les dépasser. De plus, la « vulnérabilité résilience » d'un système vivant varie dans le temps et avec le temps : elle est un processus dynamique car un système vivant, quel qu'il soit, ne reste pas passif face aux événements, il est adaptatif. Enfin, cette « vulnérabilité résilience » varie d'un pays à l'autre, selon les contextes géographiques, spatiaux, institutionnels, politiques, sociaux et économiques.

En ce sens, elle rejoint le modèle systémique de risque proposé par P. Pigeon *et al.* (2019) qui permet de reconsidérer le modèle conceptuel classique du risque et de s'éloigner du paradigme (risque = danger x vulnérabilité) donnant la priorité au danger lui-même (Fig. 4). Ces auteurs démontrent que l'identification des formes et des conditions sociales et des contextes territoriaux pour la production de connaissances scientifiques sur les risques est d'autant plus cruciale que ces formes et conditions ont un impact réel sur la situation de risque sismique très paradoxale d'Esmeraldas (Equateur).

Figure 4 - Un modèle conceptuel de risque tenant compte des conditions sociales de production de la connaissance (Source : P. Pigeon *et al.*, 2019)



Cette notion de « vulnérabilité résilience », permet de mettre en lumière le fait qu'un système, quel qu'il soit, peut être dans le même temps vulnérable à un choc et résilient. Si je reprends l'exemple des villes, ces dernières sont à la fois vulnérables et résilientes.

Les villes disposent en effet d'un potentiel de redressement important, du fait de la concentration de forces vives, des richesses, des capacités d'innovation qui fondent justement l'urbanité. En outre, elles peuvent souvent s'appuyer sur leurs arrière-pays. Leur importance stratégique fait aussi que l'on y concentre les efforts de secours et de reconstruction. Elles sont donc à la fois vulnérables et résilientes, certains de leurs attributs pouvant constituer, selon le moment, un facteur de vulnérabilité et/ou de résilience : par exemple, la concentration du capital humain, technique et financier favorise l'endommagement (donc la vulnérabilité biophysique), mais permet aussi le dépassement de la crise (donc la résilience).

D'une certaine façon, c'est même parce que l'on est vulnérable que l'on peut être résilient, au sens où l'on tire sa force de sa vulnérabilité : au sens le plus strict, il n'y a résilience que s'il y a choc et perturbation, ce qui implique l'existence d'une vulnérabilité. En poussant cette logique jusqu'au bout, ce paradoxe a été souligné : plus un système est soumis aux conséquences de sa vulnérabilité, plus il subit de crises, plus il peut montrer sa capacité de résilience (propriété), l'enrichir par l'apprentissage du désastre et devenir effectivement résilient (au sens d'état/résultat) (Provitolo et Reghezza-Zitt, 2015).

Cette notion de « vulnérabilité résilience » amène donc à penser les relations entre les concepts de vulnérabilité et de résilience comme un continuum qui se construit dans le temps et qui permet de considérer les boucles de rétroaction entre les actions mises en place dans les temporalités de la prévention, du choc et de la remise en état du système sur lequel porte l'ensemble des actions. En cela elle s'appuie sur le concept de résilience systémique précédemment expliqué.

Il s'agissait alors de répondre à la question : comment construire un modèle générique de « vulnérabilité résilience » qui puisse être employé à différentes échelles et intégrer la problématique de la dimension temporelle et des interrelations entre les éléments du système (le territoire, la ville etc.) ?

2.3. Un modèle systémique de « vulnérabilité résilience »

En nous appuyant sur les modèles d'analyses proposés par nos prédécesseurs (Ashley et Carney, 1999 ; Bousquet *et al.*, 2016 ; Carter, 1994 ; Cutter *et al.*, 2008 ; Décamps, 2007 ; Gunderson et Holling, 2002 ; Kasperson and Kasperson, 2001 ; Lim et Spanger-Siegfried, 2005 ; Mathevet et Bousquet, 2014), j'ai élaboré un modèle systémique de risque basé sur la notion de « vulnérabilité résilience » des territoires et des populations. J'ai choisi de recourir à la modélisation systémique pour tenir compte des relations et interrelations entre les composantes du système étudié. Elle offre un cadre pour réaliser des analyses multiniveaux et à différentes échelles spatiales (qu'il s'agisse par exemple d'Etats, de littoraux, de villes, de quartiers) et temporelles (avant, pendant, après le choc).

J'ai donc proposé un modèle conceptuel utilisable pour une analyse globale de la « vulnérabilité résilience » d'éléments (un territoire est constitué d'éléments de natures diverses) mis en jeu par des événements mineurs ou extrêmes. Dans ce modèle (Fig. 5), j'ai distingué la partie factuelle qui décrit le contexte (les éléments et les événements en présence) et dépeint ce qui se passe (par exemple 1000 personnes décèdent sous des décombres) de la partie « vulnérabilité résilience » qui décrit les potentialités, capacités et réactions d'un système à se protéger des risques ou des catastrophes pour un environnement temporel complet (avant, pendant et après l'évènement). Ce modèle systémique tient ainsi compte de la diversité des variables à considérer, des interactions entre ces variables et des temporalités d'un événement, telles que préconisées dans l'analyse de la vulnérabilité systémique.

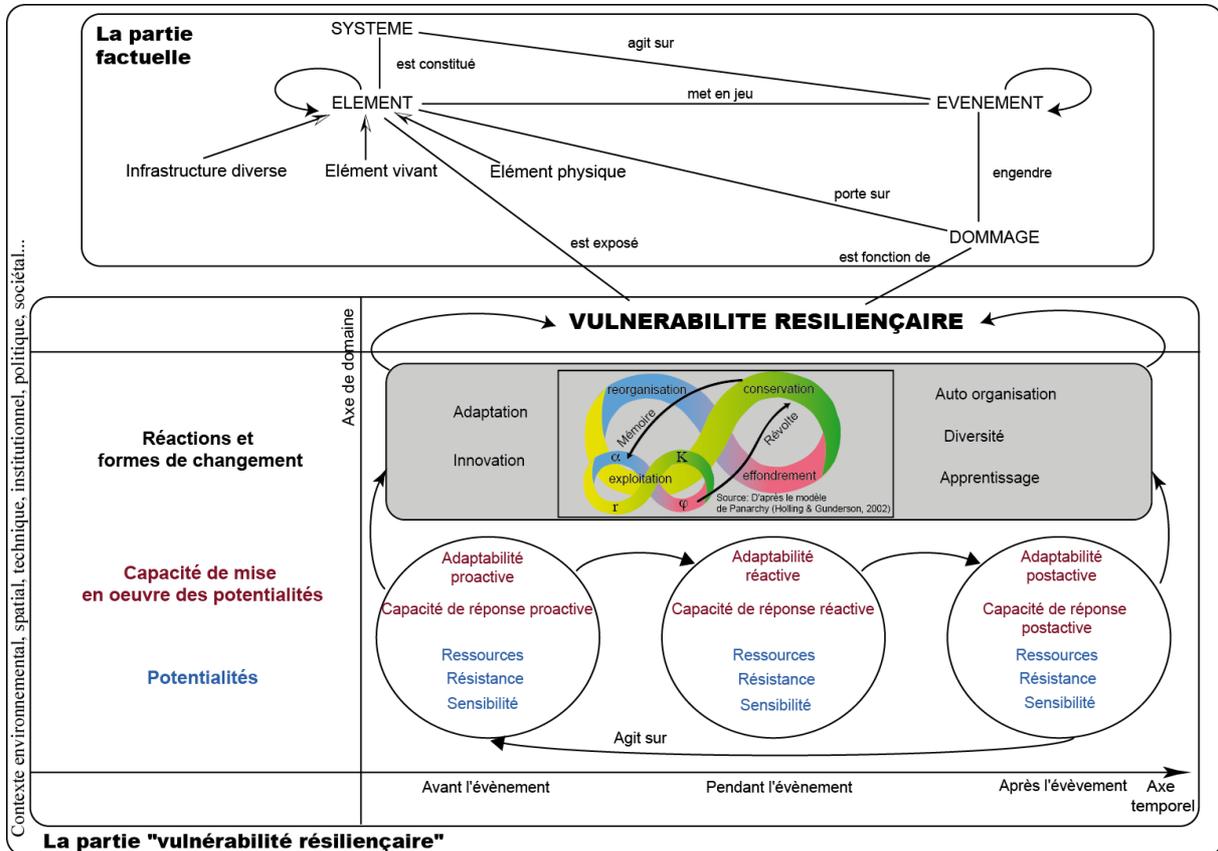
Je ne m'attarderai pas ici sur la partie factuelle qui identifie les composantes nécessaires à l'analyse d'un territoire soumis à un contexte de risque (Provitolo *et al.* 2014) et les relations entre ces composantes. Cette partie factuelle est en effet présentée en détail au chapitre 3. Elle est issue de l'ontologie du domaine des risques et catastrophes coconstruite avec des collègues géographes et informaticiens.

Précisons simplement ici, pour la compréhension, que cette partie factuelle est constituée de trois entrées principales qui s'appuient sur les états de l'art préalablement présentés :

- les éléments du territoire : ils permettent de rendre compte de la vulnérabilité territoriale, et ce, même s'ils n'ont pas été catégorisés en enjeux. Ce choix est lié au fait que la catégorisation en termes d'enjeux doit se faire au regard du territoire et du type d'évènement. Par exemple, une Préfecture est un enjeu majeur en tant que centre décisionnel, mais cet enjeu ne se retrouve pas dans toutes les villes ; un bâtiment, lui, est un enjeu majeur lors d'un tremblement de terre (risque d'effondrement) mais non lors d'une épidémie (sauf dans le cas d'une mise en quarantaine).
- les événements qui menacent ce système : ils peuvent être soudains (par exemple séismes, inondations méditerranéennes, explosions industrielles ou encore attentats) ou liés à des perturbations continues (par exemple sécheresse, canicule), être spatialement localisés (par exemple un incendie dans un bâtiment) ou au contraire diffus (par exemple une épidémie), d'origine naturelle, industrielle/technologique ou sociale. L'évènement peut être réalisé (catastrophe), probable ou potentiel (risque).

- les dommages causés par les événements, qui peuvent être de nature et d'ampleur variées, ces dommages faisant directement référence à la vulnérabilité biophysique.

Figure 5 - Un modèle conceptuel, systémique, d'analyse de la « vulnérabilité résilience » (D. Provitolo, 2012, 2013)



2.3.1. Explication de la partie « vulnérabilité résilience » du modèle

La partie « vulnérabilité résilience » du modèle est structurée autour de deux axes : l'axe temporel et l'axe de domaine. Ils permettent de souligner l'imbrication étroite entre résilience et vulnérabilité et de montrer que les relations entre les deux concepts sont ambivalentes.

L'axe temporel appréhende la « vulnérabilité résilience » comme un processus dynamique qui se construit sur un continuum temporel, comme la résilience systémique. Le modèle articule l'avant-événement (mise en place des stratégies préventives permettant, *in fine*, d'éviter ou minimiser l'entrée en catastrophe du système), le présent (l'évènement se produit et crée une situation de catastrophe, voire de crise) et le futur (l'après-événement). Ces trois environnements temporels s'influencent mutuellement en raison d'effets décalés dans le temps.

Les actions préventives, réalisées dans le cadre d'outils, réglementaires ou non, visent en effet à réduire la vulnérabilité biophysique, sociale et territoriale d'un système avant qu'un évènement ne se produise. Ces mesures anticipatives (techniques, d'aménagement du territoire, informationnelles, réglementaires et juridiques) vont agir sur le déroulement de la catastrophe : les mesures d'aménagement du territoire peuvent réduire les vulnérabilités

des populations ; les interventions sur l'aléa vont diminuer son potentiel de nuisance ; le renforcement de la résistance matérielle du bâti va limiter l'endommagement matériel et, par effet induit, les perturbations fonctionnelles qui auraient pu résulter de cet endommagement ; le contrôle de l'exposition va réduire le nombre des enjeux sinistrés, limitant le nombre de personnes à évacuer ou secourir ; l'information préventive induira des comportements appropriés, prévenant les risques de panique. À l'issue de l'évènement, l'analyse post-catastrophe, plus connue sous le nom de REtour d'EXpérience (RETEX), doit permettre d'identifier et d'analyser les défaillances et les erreurs lors de la gestion de la catastrophe, voire de la crise, mais aussi lors de la phase de préparation et de prévention. De nouvelles stratégies peuvent alors être mises en place, intégrant les leçons du passé. Ces stratégies nécessitent bien évidemment qu'il y ait capitalisation des connaissances (notamment scientifiques, opérationnelles, territoriales, les savoir-faire), leur diffusion et partage entre des acteurs aux rôles et missions variés mais dont l'objectif reste commun : assurer la sécurité et la sûreté des territoires et des populations.

L'axe de domaine permet de répondre aux questions suivantes : de quelles potentialités disposent le territoire ? Comment peuvent-elles être mises en œuvre ? quelles sont les actions et réactions effectivement réalisées dans le temps de la prévention, dans celui de la gestion du choc, et dans l'après-choc. Il s'agit dès lors de réfléchir aux risques auxquels le territoire est exposé, à la façon dont il est préparé à faire face, ferait face et pourrait dépasser la situation critique. Ce cadre de réflexion doit aider à décrypter les dysfonctionnements éventuels, les points de rupture potentielle ainsi que les forces en œuvre. L'étude à une échelle locale ou régionale est certainement la plus pertinente pour mener cette réflexion qui mérite d'être en prise avec une réalité territoriale, car pourvue de ressources spécifiques. Appliquer cette réflexion au système Monde « métasystème géographique et environnement de tous les autres systèmes » (Dollfus, 1992) aurait peu de sens. Selon les régions du monde, on se prépare à des risques de catastrophe différents : ici un excès d'eau, là une pénurie d'eau, ailleurs de l'insécurité, du réchauffement climatique etc. Et selon les continents ou les pays, les réponses des hommes politiques sont trop diversifiées ou divergentes pour être saisies dans notre modèle.

Les *potentialités* du système désignent les ressources et les capitaux disponibles (capital institutionnel, économique, social, humain, cognitif, technique, financier, etc.). Ces ressources peuvent être internes au système et aussi tirées de son environnement plus ou moins proche, notamment après l'évènement. En 2010, après le tremblement de terre en Haïti, la population a pu compter sur l'aide internationale ainsi que sur les ressources de la diaspora.

Les *capacités* permettent au système de mobiliser ses potentialités, de mettre en œuvre les ressources et le capital disponible et d'en retirer un bénéfice. En effet, ce n'est pas parce qu'une ressource est disponible qu'elle est utilisée ou qu'elle est utilisée de façon appropriée. Ainsi, la tempête Xynthia en 2010 a montré que, malgré l'existence de dispositifs de prévision performants, l'alerte n'avait pas fonctionné. Les capacités font référence à la capacité d'adaptation du système, entendue ici comme capacité à faire face et à réagir à la menace, à l'urgence ou à la situation de désorganisation consécutive à la crise (Burton *et al.*, 2002). Cette faculté d'adaptation est qualifiée de proactive, réactive ou postactive selon qu'elle se situe avant, pendant, ou après l'évènement. En réalité, il

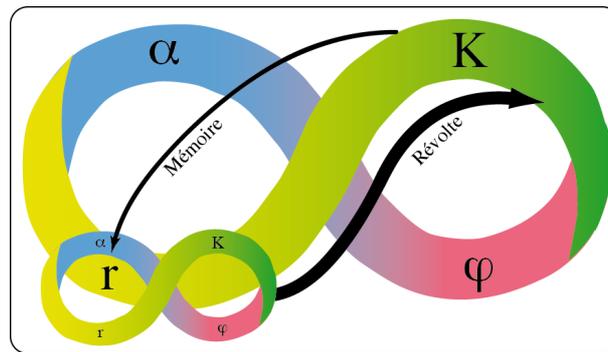
conviendrait davantage de parler d'adaptabilité (terme que nous avons privilégié dans le modèle), les capacités représentant davantage un potentiel d'adaptation qu'une adaptation effective (Brooks, 2003).

Le plus souvent l'adaptabilité est présentée dans la littérature comme une propriété qui augmente la résilience d'un système. Mais une forte adaptabilité peut de façon non intentionnelle amener à une perte de résilience et ce dans au moins trois cas (Walker *et al.*, 2006) :

- l'adaptabilité de certains groupes peut se réaliser au détriment d'autres groupes, l'adaptabilité à l'échelle micro peut s'opérer au détriment de l'adaptabilité à l'échelle macro (et inversement). Une entreprise peut par exemple faire face à une crise en se séparant de ses sous-traitants : son adaptabilité met en péril la survie des entreprises de niveau inférieur et désorganise le système économique formé à l'échelle régionale,
- l'adaptabilité à un choc connu peut entraîner une vulnérabilité accrue face à des chocs inconnus ou extrêmes. Par exemple, les structures collectives de protection (les digues, les barrages etc.) peuvent limiter les dommages et contribuer à un redressement rapide du système lorsque l'aléa et son intensité sont connus, prévisibles et que ces connaissances ont été intégrées dans les décisions politiques. Mais ces mêmes ouvrages de défense bien que vulnérables lors de risques extrêmes, ne sont pas remis en cause, et ce, afin de maintenir les dynamiques de peuplement (Pigeon, 2012),
- l'adaptabilité peut enfin conduire à la perte de la diversité des réponses, lorsque les stratégies de réponse reposent davantage sur l'anticipation d'évènements connus et prévisibles plutôt que sur celle d'évènements imprévus et incertains.

Enfin, les *réactions* correspondent aux solutions mises en œuvre au sein d'un système soumis à une crise, tandis que *les formes de changement* renvoient aux différentes trajectoires par lesquelles le système peut transiter. Réactions et formes de changement sont liées. Elles vont dépendre des ressources existantes, disponibles, et de la capacité effective à les mobiliser au bon moment et de façon pertinente. J'ai choisi d'intégrer le modèle de panarchie de L. Gunderson et C. S. Holling (Fig. 6) pour illustrer la phase intitulée « réactions et formes de changement ». Ce choix n'est pas anodin. Le modèle de panarchie stylise les transitions possibles entre différents états et met en lumière le fait que le système peut se renouveler et se réorganiser à la suite d'un choc. Ce modèle comprend quatre phases qui correspondent aux différentes trajectoires par lesquelles le système étudié transite : tout d'abord la croissance du système (r), puis sa conservation (K), ensuite son effondrement (φ) et enfin sa réorganisation, son re-nouveau (α). La résilience correspond ainsi à la capacité du système à passer d'un équilibre à un autre à travers ces quatre phases (Châtaignier, 2014). L'originalité du modèle de panarchie est de proposer une analyse multiscalaire de la résilience dans une perspective systémique. J'y reviendrai dans la partie 4 relative à mes perspectives de recherches.

Figure 6 – Le modèle de panarchie, un modèle d'analyse multiscalaire (Source : Holling et Gunderson, 2002)



Dans le cadre du modèle de « vulnérabilité résilience », le modèle de panarchie est couplé aux facteurs qui agissent sur la résilience. Parmi les facteurs positifs qui augmentent la résilience d'un système soumis à une perturbation, cinq sont souvent cités : la diversité, l'auto-organisation, l'apprentissage et l'adaptation, l'innovation et parfois la résistance ou robustesse (cela dépend des courants de pensée) (Adger *et al.*, 2005 ; Klein *et al.*, 2003 ; Folke, 2006). Inversement, divers facteurs réduisent la résilience sociale. L'opposition à toutes les formes d'innovation, un pouvoir excessif sanctionnant toute déviance idéologique, une centralisation excessive des prises de décision sont des exemples de mécanismes qui diminueraient les effets bénéfiques de la résilience (Dauphiné et Provitolo, 2007). Mais il s'agira de véritablement questionner, dans le cadre de mon projet de recherche (partie 4), en quoi ces facteurs améliorent ou minimisent la résilience des territoires et des villes.

2.3.2. Un modèle d'aide à la réflexion

Lors de sa conception, j'ai pensé ce modèle de connaissance à destination de la communauté scientifique tel un modèle graphique systémique. Il s'agit d'un modèle formel qui, bien qu'identifiant les objets et les relations entre ces objets, reste purement iconique (Walliser, 1977). Il fournit un cadre pour organiser la réflexion et répondre à des questions spécifiques : quelles ressources disponibles, quelles capacités de réaction, quelles actions et réactions effectives ?

Ce modèle a ainsi été mobilisé pour étudier l'évolution des facteurs de vulnérabilité face au risque tsunami en Nouvelle-Calédonie (Le Duff *et al.*, 2016) ou le rôle des technologies spatiales dans la gestion des risques et catastrophes dans les pays en développement (Provitolo, 2012). Pour le premier exemple, les auteurs démontrent que la nature de l'aléa associée aux facteurs de vulnérabilité étudiés et au contexte juridique très spécifique de la Nouvelle-Calédonie imposerait de repenser le modèle de gestion du risque proposé et notamment, du volet prévention. Depuis le transfert de la compétence de la Sécurité Civile en 2014, L'Etat, puis le Gouvernement de la Nouvelle-Calédonie, ont organisé leur stratégie de prévention autour d'une réponse structurelle à l'aléa : déployer un dispositif d'alerte automatisé des populations : les sirènes. Cette approche de gestion s'inscrit dans une logique de protection, de résistance. On oppose ainsi à l'aléa une réponse uniquement matérielle, technique, pensant ainsi construire la résilience territoriale.

Ce constat est révélateur du fait que la complexité des systèmes territoriaux génère des difficultés de capitalisation et de partage des connaissances par différents acteurs et communautés scientifiques. Le modèle amène donc à s'interroger sur la façon dont les modélisations conceptuelles peuvent être mobilisées par les décideurs publics pour faire face à des situations à risques pour lesquelles la société attend des résiliences, des adaptations. Mais la modélisation pose aussi le problème de la recevabilité politique et sociale, d'outils qui montrent le caractère nécessairement limité des formes d'action politique... (Séminaire « Gestion des risques et complexité », P. Pigeon, Le Bourget du Lac, 2010).

La représentation graphique relativement complexe du modèle de « vulnérabilité résilience » rend celui-ci difficilement réutilisable par les acteurs institutionnels et opérationnels en charge de la réduction des risques de catastrophe.

La prise en main de ce modèle formel, purement symbolique et iconique (Walliser, 1977) pourrait être envisagée dans le cadre de groupes de travail acteurs-chercheurs. Il faudrait réfléchir à une animation spécifique. Cela permettrait de souligner l'imbrication étroite entre résilience et vulnérabilité, de montrer que les relations entre les deux concepts sont ambivalentes, de capitaliser et partager les connaissances : celles contextualisées et opérationnelles, spécifiques aux territoires, bien connus des acteurs, et les connaissances génériques issues des modélisations conceptuelles. Ce modèle symbolique peut ainsi être envisagé comme un modèle d'aide à la réflexion.

Il peut par exemple être utilisé comme cadre de réflexion permettant de sensibiliser les pouvoirs publics au fait que selon le sous-domaine considéré (propriété/capacité/réaction) et selon les échelles spatiale et temporelle envisagées, il est possible d'interpréter les situations tantôt en termes de vulnérabilité, tantôt en termes de résilience. Par exemple, la vulnérabilité de l'infrastructure matérielle d'un réseau de transport (propriété avant l'évènement) n'implique pas forcément un arrêt du service rendu (réaction pendant l'évènement). La structure du réseau et le comportement des gestionnaires de ce réseau (capacités), qui s'appuient sur des plans de gestion de crise et de continuité d'activité (ressources constituées avant l'évènement), peuvent en effet permettre d'assurer le maintien du service et donc la résilience des fonctions de l'infrastructure (Barroca *et al.* 2012 ; Landau et Diab, 2017 ; Lhomme 2012). On peut donc dire soit que le système est vulnérable, soit qu'il est résilient : tout dépend de ce sur quoi l'on veut insister.

Ce modèle peut aussi souligner que vulnérabilité et résilience ne sont pas reliées entre elles à la manière de vases communicants. La mobilisation de ressources techniques pour augmenter la capacité de résistance des infrastructures *avant* l'évènement diminuera ainsi la vulnérabilité biophysique du système *pendant* l'évènement et augmentera le potentiel de résilience du système *après* l'évènement. La diminution de la vulnérabilité entraîne ici l'augmentation de la résilience. Mais, si la vulnérabilité d'un élément du système, révélée *pendant* l'évènement, diminue le potentiel de résilience du système *après* l'évènement, elle peut aussi être nécessaire pour révéler une faiblesse du système *antérieure* à l'évènement et permettre d'augmenter *à plus longue échéance* sa résilience. Par exemple, la tempête de 1999 a révélé la vulnérabilité des écosystèmes forestiers. Mais elle a aussi permis une prise de conscience des défauts de la gestion des forêts françaises et une remise à plat de certains dispositifs ou de certaines logiques qui devraient à plus long terme assurer une résilience

plus grande des espaces forestiers. La vulnérabilité diminue ainsi la résilience à court terme, mais peut l'augmenter à long terme. Cet exemple permet ainsi d'attirer l'attention des acteurs sur le fait que la résilience ne peut pas signifier un retour à l'état antérieur, qui conserverait en l'état les vulnérabilités du système et de ses composantes.

Enfin, ce modèle peut montrer que le maintien de certaines vulnérabilités pourrait être nécessaire à la résilience du système. Jusqu'à un certain seuil, continuer à subir des chocs et des dommages (signe d'un certain degré de vulnérabilité) peut ainsi constituer une ressource (*potentialité*), car cela permet au système de rester en alerte et d'entretenir ses *capacités* et ses *réactions* : la récurrence de séismes de faible magnitude au Japon prépare par exemple l'archipel à l'occurrence du « Big one ». De même, la vulnérabilité de certains éléments du système peut devenir un facteur de résilience du système dans son ensemble : les déversoirs de crue ont pour fonction de maintenir la vulnérabilité de certains espaces qui seront inondés pour assurer la résilience du système à l'échelle macro. Ainsi, de même que la résilience peut être vue comme négative, à partir du moment où elle pérennise des formes de vulnérabilité en conservant à l'identique les systèmes, de même la vulnérabilité peut constituer un attribut positif.

Ces réflexions conceptuelles poussées ont donc permis de cerner les multiples formes de vulnérabilités et de résiliences dans le domaine des risques et catastrophes, d'identifier les problématiques de complexité inhérentes à ces objets de recherche, d'illustrer ces complexités par des observations et analyses d'événements catastrophiques, et de proposer un modèle conceptuel systémique liant les concepts de vulnérabilité et de résilience.

Conclusion

Toutefois, les définitions et les modèles de résilience sont textuels et qualitatifs. Ils ne favorisent pas les approches quantitatives, qui pourraient être intéressantes à mobiliser pour évaluer la résilience. Ainsi, si le modèle stylisé de panarchie (Gunderson et Holling, 2002) (Fig. 6) qui est utilisé pour étudier la résilience systémique et le modèle de « vulnérabilité résiliençaire » révèlent bien la complexité des risques et catastrophes, ils présentent plusieurs limites et questionnements que nous souhaitons aborder dans les années à venir (cf. partie 4). Tout d'abord, ces modèles sont trop génériques pour être pleinement mobilisés dans le cadre d'une recherche impliquée en prévention des risques et gestion des catastrophes. Il ressort de l'ensemble de ces recherches que la résilience reste un concept peu opérationnel en géographie des risques. L'un des objectifs de notre projet de recherche sera donc de rendre ce concept opérationnel, en élaborant des modèles moins génériques et en proposant des mesures pour des résiliences de court (par exemple, la durée de remise en état des réseaux critiques) et de long terme (par exemple, les actions *ex-ante* des politiques publiques). Toute la difficulté pour mesurer la résilience est qu'elle joue sur différentes temporalités : celle des « mesures de politiques préventives *ex-ante*, des analyses du choc et de ses effets en termes de rupture, et des actions publiques *ex-post* » (Dubois et Ouattara, 2014). Il faudra donc interroger les temporalités et les échelles spatiales sur lesquelles mesurer la résilience. L'ensemble de ces réflexions amènera à questionner les stratégies d'anticipation et de résilience permettant de faire face aux risques et catastrophes (chap. 10).

Enfin, ce modèle de « vulnérabilité résilience », casse les barrières qui nous semblaient trop imperméables entre vulnérabilité et résilience. Mais comme la majorité des modèles conceptuels, ces derniers n'apportent pas de solution clés en main pour la prise de décision. Aucune spécification du modèle, aucune simulation pour tester le rôle de certaines variables, imaginer des scénarios, simuler leurs effets potentiels sur les territoires ne peut être effectuée. Il est ainsi peu envisageable de « jouer » de façon interactive sur ce type de modèle iconique, ce qui restreint la coconstruction de la connaissance entre des disciplines variées et des tuteurs de résilience selon l'expression de B. Cyrulnik (2001) (acteurs institutionnels, opérationnels, sociaux etc.), en charge de la mise en place des mesures de politique publique et qui, par leurs interventions, facilitent la résilience. Quel autre type de modélisation alors privilégier pour construire et représenter la connaissance relative à la multidimensionnalité des risques et catastrophes, à leurs complexités structurelles, spatiales et temporelles, aux jeux d'interactions, aux effets de dominos ? Des premiers éléments sont apportés avec la modélisation ontologique (cf. chapitre 3) et les modèles d'aide à la décision (cf. partie 3) et seront développés dans nos futures recherches (cf. partie 4).

Chapitre 3

Une ontologie conceptuelle du domaine des risques et des catastrophes

Mon objectif était de proposer un modèle de représentation des connaissances pour analyser et scénariser différents types de risques ou catastrophes, qu'ils soient d'origine naturelle, industrielle/technologique, sociale ou le résultat d'effets de dominos ; qu'ils soient localisés ou diffus, que leurs descripteurs spatio-temporels correspondent à des temporalités brèves ou longues, à des déclenchements soudains ou non. Je souhaitais ainsi placer les relations et interactions entre les éléments du système au cœur de la modélisation afin de gérer des scénarios complexes résultant de la diversité des types d'évènements et de leur caractère multiscale (micro, méso, macro). Ceci, afin de faciliter les mises en perspective d'évènements différents ayant *a priori* peu d'éléments communs, et de proposer une méthodologie d'aide à la comparaison d'évènements catastrophiques se produisant dans le monde.

Pour remédier la limite de la modélisation conceptuelle iconique (cf partie supra), et formaliser la connaissance du domaine des risques et catastrophes, l'approche adoptée a été d'utiliser les potentialités des ontologies. En effet, celles-ci offrent les éléments nécessaires à la description des notions mais aussi des liens qui les unissent tout en permettant d'effectuer des raisonnements (Napoli, 2004).

Léna Sanders (UMR Géographie-Cités) m'a offert l'opportunité d'intégrer un projet de recherche dédié aux ontologies, le projet CO-SMA-GEMS⁹ financé par l'Agence Nationale de la Recherche et piloté par D. Phan (UMR GEMASS). Une chance, car ce projet m'a permis d'échanger avec des chercheurs issus d'autres domaines disciplinaires (par exemple la sociologie, l'économie, la philosophie) et des chercheurs en informatique ouverts aux problématiques de thématicien(nes). J'ai ainsi rencontré J.P. Müller (CIRAD Montpellier), informaticien, spécialisé dans le développement de méthodologies de modélisation multidisciplinaire, méthodologies structurées autour de la modélisation conceptuelle.

Dans ce contexte de recherche, je me suis formée à un nouveau langage informatique de modélisation, le langage UML (*Unified Modelling Language*) (Cranfield and Purvis, 1999 ; Bommel et Müller, 2007), afin de proposer avec mes collègues géographes et informaticiens une ontologie formalisée du domaine des risques et catastrophes.

En informatique, une ontologie se définit comme une spécification de la conceptualisation d'un domaine (Grüber, 1993). L'ontologie constituée est un modèle d'organisation et de représentation d'un ensemble de concepts et notions du domaine ainsi que des relations entre ces concepts et notions. Elle est employée pour raisonner sur les objets du domaine. Dans notre cas, le domaine est celui des risques et des catastrophes et nous en avons proposé la spécification.

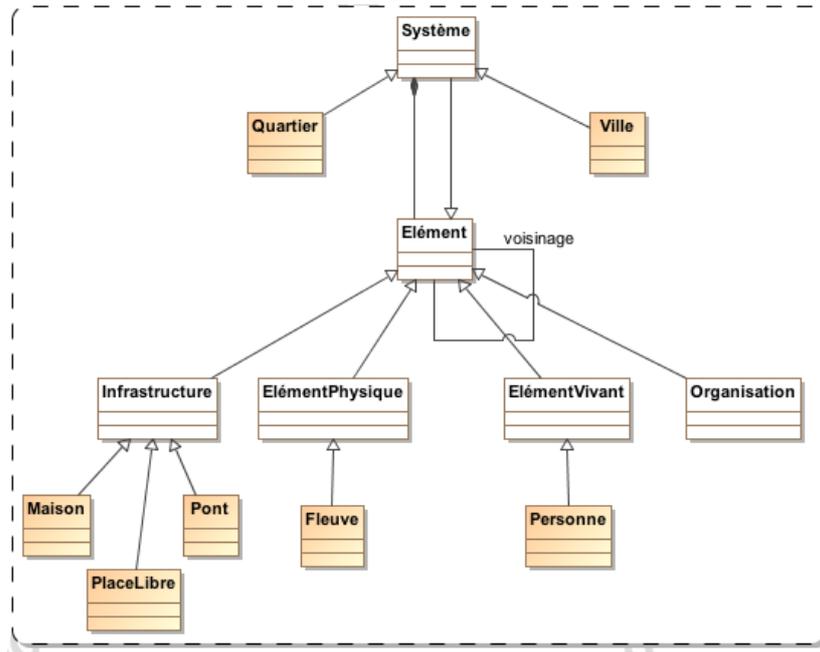
⁹ Agence Nationale de la Recherche : Programme thématique en sciences humaines et sociales 2007 : Corpus et outils de la recherche en sciences humaines et sociales - Titre du projet : Corpus d'Ontologie pour les Systèmes Multi-Agents en Géographie, Economie, Marketing et Sociologie. – acronyme CO-SMA-GEMS - <http://www.gemas.fr/dphan/cosmagems/> (PI D. Phan, GEMAS) – Financé 2007/2010

Pour construire cette ontologie, deux approches ont été retenues. Elles nécessitaient la collaboration entre géographes thématiques-modélisateurs et informaticiens modélisateurs-thématiques spécialisés dans l'étude des systèmes complexes :

- l'approche systémique : clé d'entrée pour réaliser le métamodèle conceptuel, cette approche, qui constitue mon domaine d'expertise, a permis d'identifier les objets du domaine des risques et catastrophes qui sont par essence composites et dont il faut articuler les dimensions et les logiques différentes,
- l'approche ontologique : en informatique, une ontologie est un modèle d'organisation et de représentation des connaissances d'un domaine. Pour construire l'ontologie du domaine des risques et catastrophes, nous avons utilisé le langage UML (*Unified Modelling Language*). En effet, les ontologies ne fournissent pas de moyens graphiques standards pour les représenter, alors qu'une représentation graphique est souvent un moyen très performant de communication. UML étant un langage formel de description, fournit une telle représentation. Il s'agit d'un langage de modélisation qui s'appuie sur l'utilisation de différents diagrammes (diagrammes de classes, d'objets...) proposant une représentation simplifiée et organisée des entités du domaine, de leurs interactions et permettant de définir ainsi les spécifications du système d'information à développer. UML présente l'intérêt de faciliter l'implication des utilisateurs et des experts du domaine dans le processus de modélisation et facilite donc l'élaboration du modèle conceptuel et la communication entre utilisateurs, experts du domaine et informaticiens (Davoine, 2014).

Deux groupes de diagrammes ont été utilisés. Les diagrammes de classe (fond blanc – Fig. 7) symbolisent les concepts et leurs attributs par des boîtes rectangulaires et les relations entre les concepts par différents types de traits ou flèches. Ces diagrammes de classes permettent de représenter la structure et la dynamique du modèle à différentes échelles et niveaux d'organisation. Avec ce langage, il a été possible de distinguer plusieurs types de relation : par exemple, la relation de généralisation/spécialisation exprime qu'un concept est plus général/plus spécifique qu'un autre (flèche avec un triangle blanc vers le concept le plus général), et les relations sémantiques portent le nom de la relation. Une fois le diagramme de classe réalisé, il est possible de l'instancier pour reproduire un événement catastrophique spécifique. Pour représenter ces instances et leurs liens structurels et temporels, un autre diagramme d'UML est utilisé : le diagramme d'objets (fond orange – Fig. 7). Un diagramme d'objets représente chaque instance par une boîte mentionnant la notion instanciée avec un nom éventuel permettant de l'identifier, et chaque relation par un trait ou une flèche. Ces liens sont eux-mêmes des instances des relations sémantiques entre les notions. Par exemple, on peut dire au niveau conceptuel qu'un événement peut en causer un autre (il y a une relation sémantique de causalité entre événements) et les liens pourront exprimer quels événements ont effectivement causé d'autres événements.

Figure 7 – Les diagrammes de classes et d'objets (Source : D. Provitolo, E. Dubos-Paillard et J.P. Müller, 2014)



3.1. Présentation de l'ontologie conceptuelle

Article - Provitolo D., Dubos-Paillard E. et Müller J.-P., 2014, « Une ontologie conceptuelle du domaine des risques et catastrophes », In : *Ontologies et modélisation par SMA en SHS*, D. Phan (eds), Hermes, Lavoisier, 558 p. (résultat de l'ANR *Cosmagems*).

Chapitre 10¹⁰*

Une ontologie conceptuelle du domaine des risques et des catastrophes

* Chapitre rédigé par PROVITOLLO D., DUBOS-PAILLARD E., MÜLLER J.P.

10.1. Introduction

Le domaine des risques et des catastrophes fait l'objet de recherches foisonnantes sur les concepts et sur l'analyse d'évènements. La plupart se présentent sous la forme de monographies, tandis que d'autres, plus abouties, utilisent les outils et méthodes d'analyse des risques pour appréhender ces phénomènes, réaliser des scénarios de risque ou reconstruire des événements passés ([BEC 09], [BOL 12], [COM 07], [CUT 00], [DUB 12], [D'ER 09], [LUE 05], [MAR 08], [NOV 06], [PRO 07], [PIG 05] [REG 2012], [RUF 08], [RUI 10], [SAH 11], [SER 12], [WIS 04], cette liste ne saurait être exhaustive tant les publications sont nombreuses). Ces cas d'étude ont indéniablement enrichi les connaissances sur les risques et catastrophes, et notamment sur leur volet sociétal. Cependant, ils permettent difficilement d'établir des comparaisons et de comprendre les fondements communs de ces risques potentiels ou catastrophes bien réelles.

Mis à part dans le domaine des risques industriels et technologiques où il existe diverses méthodes permettant l'identification des dangers et des risques associés à un produit ou à une activité (analyse par arbres de défaillance, par arbres d'évènements, analyse selon le principe du nœud papillon), rares sont les essais de modélisation prenant en compte les interactions entre les événements, les effets de dominos, les imbrications d'échelles spatiales et temporelles.

Les auteurs de l'ouvrage *At risk* ([BLA 94] [WIS 04]) ont proposé deux modèles graphiques de modélisation de la complexité des risques et catastrophes. Le premier, le modèle PAR (Pressure and Release), place le risque au croisement d'une progression de la vulnérabilité et de l'aléa. Mais les interactions entre les éléments ainsi que leurs descripteurs spatio-temporels (occurrence, déclenchement, durée) ne sont pas pris en compte, ce qui est peu compatible avec les connaissances déjà acquises sur les risques [DAU 13]. Face à ces limites, un deuxième modèle, nommé Access, a été proposé. Ce dernier fournit une grille de lecture permettant d'analyser comment les différences dans l'accès aux ressources politiques ou économiques influent sur les capacités des ménages à faire face aux catastrophes. Moins linéaire, ce modèle semble mieux adapté pour comprendre la complexité des risques, notamment le volet vulnérabilité, mais il n'est utilisé qu'une fois par les auteurs, à propos des famines. Il est donc difficile d'apprécier sa validité et son efficacité.

Plus récemment, un modèle de gestion du cycle des sécheresses, le modèle Drought Cycle Management, a été proposé pour réduire la vulnérabilité des communautés exposées au risque de sécheresse [SCH 09]. Ce modèle identifie les actions individuelles et institutionnelles à mettre en œuvre tout au long du continuum temporel du risque et de la catastrophe, à savoir les actions de mitigation, de préparation, de secours et reconstruction. Mais les interactions entre les actions restent là encore peu formalisées. De plus, ce modèle est dédié à un type de risque et au cadre de vie pastorale, il est donc difficilement transposable.

Enfin, dans le domaine spécifique des systèmes homme-machine, des modèles systémiques d'analyse des accidents ont été proposés par [LEV 03] et [HOL 04]. Ces modèles décrivent le processus d'accident comme un ensemble d'évènements interconnectés, un accident survenant lorsque des facteurs humains, techniques et organisationnels coexistent en un même lieu et temps donné. La méthode WBA -Why-Because Analysis- est probablement la plus formelle et la plus aboutie pour analyser ces accidents [QUR 08]. Mais de par la prégnance de la machine, ces modèles sont dédiés à l'analyse des accidents nucléaires ou de transport. Ils

sont plus difficilement transposables à l'analyse de catastrophe naturelle, biologique ou sociale. À notre connaissance, la méthode WBA n'a pas été validée pour analyser des enchaînements de différents types d'événements (nat-tech ou tech-nat) au cours d'une même catastrophe et intégrer leur caractère multi-scalaire (micro, méso, macro).

En s'appuyant sur les travaux de nos prédécesseurs, nous proposons donc une ontologie conceptuelle du domaine des risques et catastrophes. Cette dernière place les relations et interactions entre les éléments du système au cœur de la modélisation afin de gérer des scénarios complexes résultant de la diversité des types d'événements et de leur caractère multi-scalaire. Cette ontologie fournit un cadre conceptuel utilisable pour l'analyse de différents types d'événements, qu'ils soient d'origine naturelle, industrielle/technologique, biologique, sociale ou le résultat d'effets de dominos, qu'ils soient localisés ou diffus, que leurs descripteurs spatio-temporels correspondent à des temporalités brèves ou longues, à des déclenchements soudains ou non. L'ontologie ambitionne également d'être adaptée pour étudier les événements à différentes échelles (micro, méso, macro). Ceci, afin de faciliter les mises en perspective d'événements différents ayant *a priori* peu d'éléments communs et de proposer une méthodologie d'aide à la comparaison d'événements.

Ce chapitre s'articule en trois parties. Dans la première, nous soulignons tout d'abord l'intérêt de l'élaboration d'une ontologie du domaine des risques et catastrophes et précisons la méthodologie retenue pour la construire. Puis, dans la deuxième partie, nous présentons l'ontologie conceptuelle du domaine des risques et des catastrophes réalisée en utilisant le langage objet UML. Nous y décrivons les quatre ensembles qui la composent, à savoir la structure du système, la dynamique du système, les acteurs qui observent le système et leurs représentations. Enfin la troisième partie est un exercice de validation partielle de l'ontologie à partir du récit de P. Hadfield [HAD 92] sur le Grand Séisme de Kantô de 1923.

10.2. Apport et méthodologie de conception et validation d'une ontologie du domaine des risques et des catastrophes

En informatique, une ontologie se définit comme une spécification de la conceptualisation d'un domaine [GRÜ 93]. Une ontologie est donc un modèle d'organisation et de représentation des connaissances d'un domaine. Dans notre cas, le domaine est celui des risques et des catastrophes et nous en proposons la spécification.

On distingue en général, l'ontologie conceptuelle qui définit la terminologie, un ensemble de concepts et de notions structurés par des relations sémantiques et taxinomiques, de l'ontologie concrète qui utilise cette terminologie pour décrire une situation précise (observée ou probable). L'ontologie que nous proposons est essentiellement une ontologie conceptuelle dans laquelle nous avons distingué la terminologie utilisée pour décrire un événement passé ou potentiel (par exemple, il y a eu 500 morts dans telle ville), de la qualification de cet événement par les différents acteurs (c'est un accident, un accident grave, une crise, un désastre ou une catastrophe).

La démarche comparative étant indispensable à la production de connaissances scientifiques, l'ontologie conceptuelle proposée fournit un cadre directeur permettant la comparaison de différents événements. Elle permet également une standardisation des langages (en précisant la signification des concepts) pour traiter d'événements variés, qu'ils soient récurrents et discrets (inondations, tempêtes) ou continus (sécheresse). Elle a également pour vocation de faciliter la discussion, l'échange de points de vue entre les disciplines. Cette

ontologie conceptuelle peut ainsi être partagée et réutilisée entre les communautés.

Pour construire cette ontologie, nous avons retenu deux approches :

- l'approche systémique : clef d'entrée pour réaliser le méta modèle, cette approche permet de dépasser et décloisonner les approches disciplinaires, et de mener une réflexion approfondie sur les relations et les interactions entre un ensemble d'éléments.

- l'approche ontologique : le modèle conceptuel a été représenté par des diagrammes de classe d'UML (Unified Modelling Language) [CRA 99]. En effet, les ontologies ne fournissent pas de moyens graphiques standards pour les représenter alors qu'une représentation graphique est souvent un moyen très performant de communication. UML fournit une telle représentation et en particulier les diagrammes de classe qui représentent les concepts et leurs attributs par des boîtes rectangulaires et les relations entre les concepts par différents types de traits ou flèches. On distingue plusieurs types de relation : par exemple, la relation de généralisation/spécialisation qui permet d'exprimer qu'un concept est plus général/plus spécifique qu'un autre (flèche avec un triangle blanc vers le concept le plus général) et les relations sémantiques qui portent le nom de la relation et les cardinalités associées (combien d'objets peuvent être en relation avec combien d'autres).

L'ontologie conceptuelle réalisée, cette dernière peut ensuite être « instanciée » pour représenter un ou plusieurs cas d'étude, qu'ils relèvent du risque ou de la catastrophe. La méthodologie d'instanciation de l'ontologie s'effectue souvent en deux temps :

- la « spécialisation » des concepts génériques,
- l'élaboration du « diagramme d'objets » qui permet une représentation d'un cas étudié.

Dans un premier temps, la spécialisation des concepts génériques permet de prendre en compte une situation spécifique tout en utilisant des termes qui restent relativement généraux. Cette spécialisation permet de décrire la ou les structures observées (pays, ville, quartier, vallée, zone de montagne, réseau routier, etc) et les types d'événements qui sont susceptibles ou qui ont effectivement affecté la structure (tremblement de terre, éboulement, inondation, embouteillage, accident, etc). Dans un second temps, il est possible de réaliser une instanciation pour reproduire le cas étudié proprement dit (Grand Séisme de Kantô de 1923, séisme de Kobé de 1995, accident nucléaire de Fukushima de 2011). Pour représenter ces instances et leurs liens structurels et temporels, un autre diagramme UML est utilisé : le diagramme d'objets. Ce diagramme représente chaque instance par une boîte mentionnant la notion instanciée avec un nom éventuel permettant de l'identifier et chaque relation par un trait ou une flèche. Ces liens sont eux-mêmes des instances des relations sémantiques entre les notions. Par exemple, on peut dire au niveau conceptuel qu'un événement peut en causer un autre (il y a une relation sémantique de causalité entre événements) et les liens pourront exprimer quels événements ont effectivement causé d'autres événements. Dans le cas de la triple catastrophe qui s'est déroulée au Japon en mars 2011, la spécialisation de l'événement met dans un premier temps en lumière l'enchaînement de trois événements majeurs, à savoir un séisme, un tsunami et un accident nucléaire. Leur instanciation permet de préciser qu'il s'agit du tremblement de terre de la côte est du Japon qui déclenche le tsunami à l'origine de la catastrophe nucléaire de Fukushima.

10.3. Une ontologie conceptuelle du domaine des risques et catastrophes

Pour réaliser cette ontologie conceptuelle, nous avons construit quatre sous-systèmes reliés entre eux (cf. figure 10.1) :

- le sous-système *Structure* identifie les éléments pertinents à l'analyse d'un système soumis à des événements potentiellement catastrophiques,
- le sous-système *Dynamique* identifie les éléments constituant un déroulement effectif d'événements,
- le sous-système *Acteur* permet d'énumérer les différentes parties prenantes du système,
- le sous-système *Représentation* permet pour chaque acteur d'explicitier ses catégories d'analyse des éléments et des événements, réels, possibles ou imaginaires qui s'y déroulent, en termes de vulnérabilité, d'acceptabilité, de risque, d'accident, de catastrophe. Ce sous-système est lui-même composé de deux autres sous-systèmes qui correspondent respectivement au *Référentiel conceptuel de l'acteur* et à la *Qualification d'une situation*.

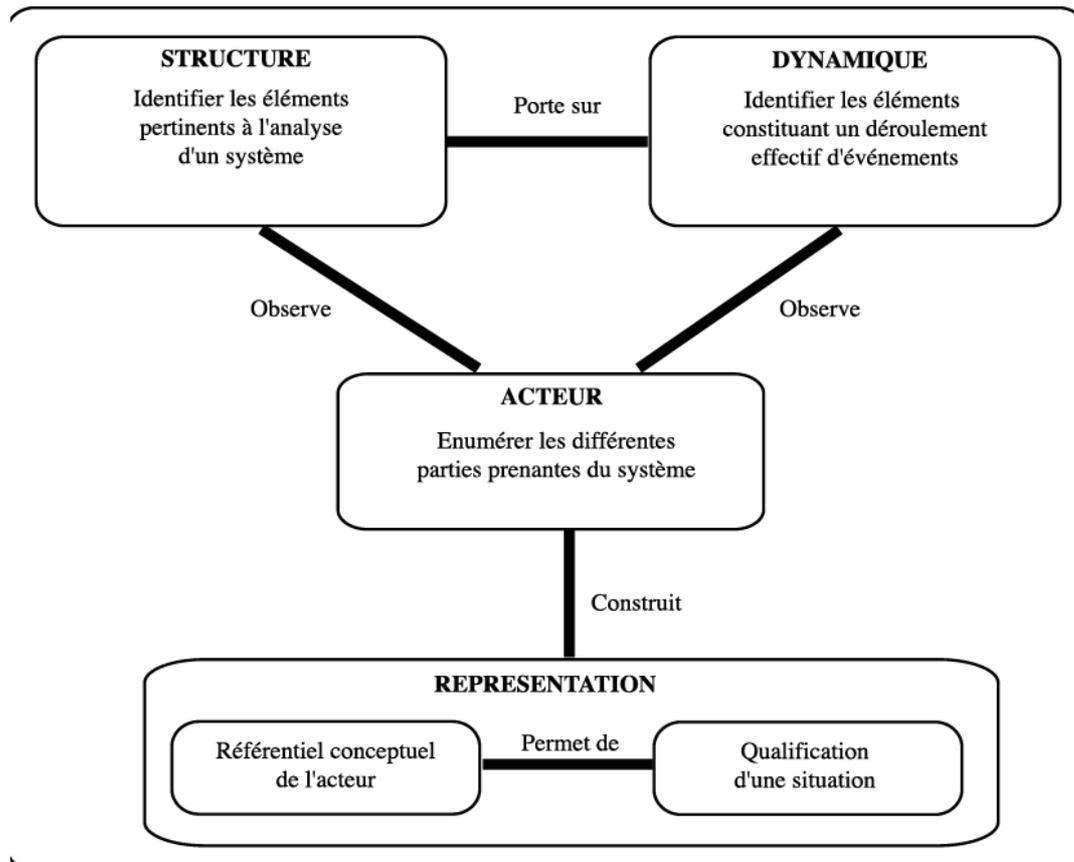


Figure 10.1. Découpage systémique du modèle en quatre sous-systèmes

10.3.1. La structure du système

La *Structure* identifie les « éléments » pertinents à l'analyse d'un système soumis à des « événements » potentiellement catastrophiques. Ce système est ouvert sur son environnement (au sens systémique du terme). Il est donc également influencé par des « éléments exogènes » qui sont, par définition, en dehors du champ d'étude (cf. figure 10.2).

La classe *Elément* généralise les classes « *Elément vivant* », « *Elément physique* », et « *Infrastructure diverse* ». Pour définir les termes précédemment énoncés :

- l'« élément vivant » regroupe l'ensemble des humains et des populations naturelles, telles la faune et la flore, en d'autres termes, les composantes biotiques du système,
- l'« élément physique » correspond aux composantes abiotiques des géosystèmes : le relief, le climat, l'hydrographie, les sols, etc,

- l'« infrastructure diverse » englobe le bâti, les équipements, les réseaux, etc, c'est-à-dire l'ensemble des aménagements anthropiques présents sur le territoire.

Cette catégorisation permet de balayer l'ensemble des composantes du système qui peuvent être mises en jeu lors d'un risque, d'un accident, d'un désastre ou d'une catastrophe.

Un élément du système à une échelle donnée peut lui-même prendre la forme d'un « système » à une autre échelle. Nous pouvons ainsi représenter l'imbrication de niveaux spatiaux par le biais d'une relation d'agrégation entre les classes nommées système et élément (des systèmes sont ainsi composés de systèmes, eux-mêmes faits de systèmes etc). La relation « agit sur » (au sens où il y a l'action d'un élément sur un autre) résulte de la composition des relations « met en jeu » et « relation causale » entre événements. On notera également la « relation de voisinage » entre les éléments du système. La notion de voisinage fait référence à un espace topologique. Cette approche topologique est essentielle car elle permet d'individualiser des sous-ensembles spatiaux, de réaliser une analyse de la diffusion d'un événement. En effet, bien souvent les descriptions littéraires de catastrophe ne fournissent pas d'indications suffisamment précises pour procéder à une cartographie. L'approche topologique permet donc de pallier ce déficit, et d'appréhender la spatialité de l'événement, essentielle à sa compréhension.

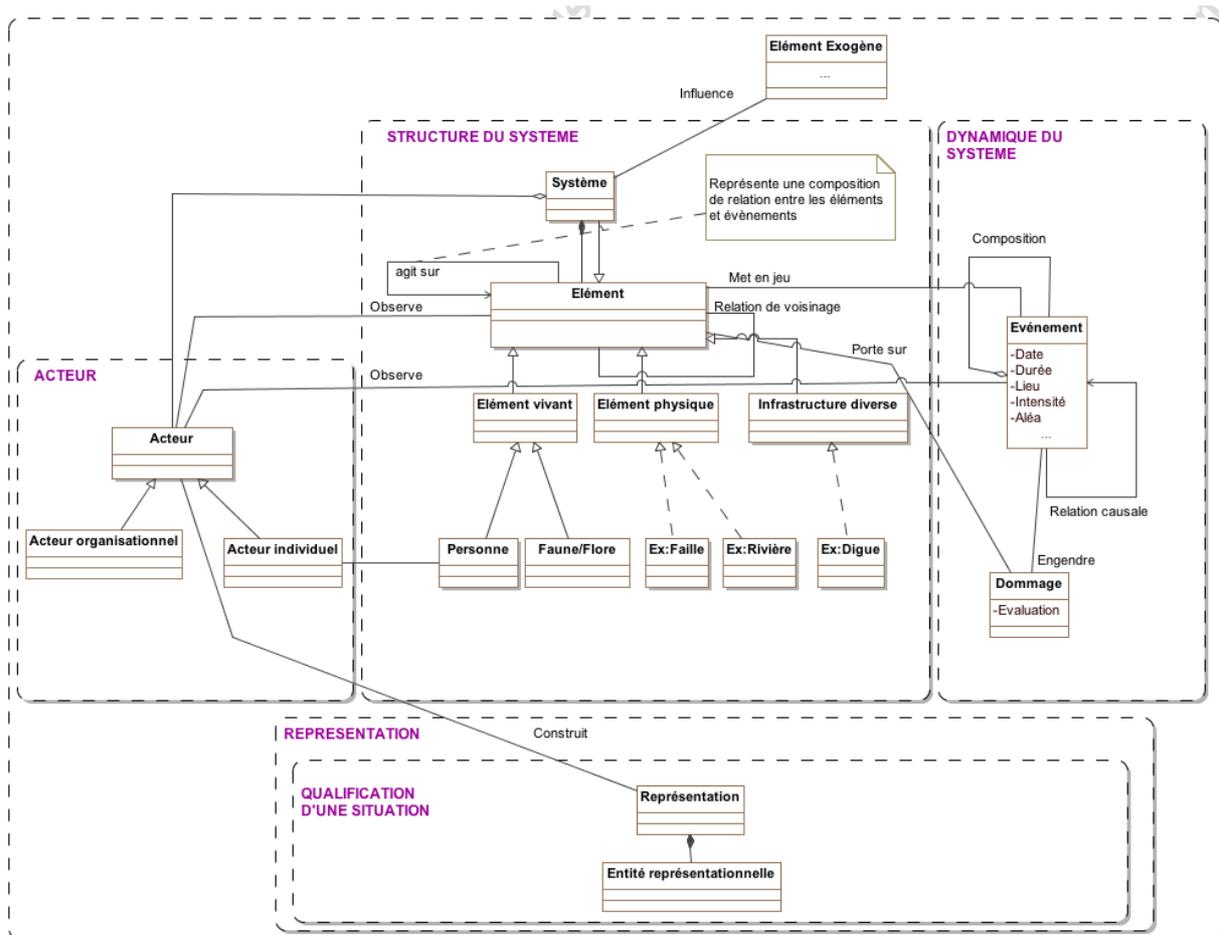


Figure 10.2. La structure du système et ses relations avec les sous-systèmes Dynamique, Acteur et Représentation

Ce sous-système *Structure* est en relation avec les sous-systèmes *Acteur* et *Dynamique* : avec l'*acteur* car l'entité homonyme est une composante de la classe « système » (lien d'agrégation), avec la *dynamique* car les événements « mettent en jeu » les éléments tandis

que les « dommages » portent sur la classe élément.

10.3.2. La dynamique du système

De même que la *Structure du système* se compose d'éléments, la *Dynamique du système* (cf. figure 10.3) se compose de structures élémentaires que sont les « événements ». L'événement met en jeu des éléments du système. Les éléments ne sont en effet rien d'autre que les supports sur lesquels les événements viennent s'inscrire. Un même événement peut mettre en jeu plusieurs éléments et un élément peut être soumis à plusieurs événements distincts. La relation « met en jeu » indique que l'élément est exposé à l'événement, mais cette exposition ne présuppose pas de sa vulnérabilité.

Dans cette ontologie, un événement est une occurrence d'un « type d'événement » qui peut être d'origine naturelle, technologique, sociale, sanitaire etc. L'événement est le plus souvent un fait extraordinaire, exceptionnel par rapport à l'expérience et à l'horizon du quotidien (par exemple le tsunami de décembre 2004 dans l'Océan indien ou celui plus récent d'octobre 2009 sur l'île de Sumatra, la catastrophe de Fukushima au Japon en mars 2011). Toutefois, certains événements, du fait de leur permanence, ne peuvent être considérés comme exceptionnels, mais ils ne perdent pas leur potentiel catastrophique : ainsi en est-il des sécheresses en Afrique ou des inondations liées au phénomène de mousson en Asie.

L'événement peut correspondre à un phénomène effectif, probable ou potentiel. Lorsque l'événement relève du domaine du probable ou du potentiel, cela renvoie à la notion de risque dans le sous-système *Représentation*. On peut être face « un risque quantifié » ou risque probable (à partir de séries statistiques d'événements s'étant déjà produits) ou « non quantifié » (absence de séries statistiques). « Le risque non quantifié » ou risque potentiel est un risque dont on ne peut évaluer ni le temps de retour ni la probabilité de réapparition, car l'événement (qui concrétise le risque) ne s'est jamais ou que très rarement produit. En revanche, même dans le cadre d'un risque potentiel, on est en mesure d'identifier le ou les aléas pouvant générer l'événement. Par ailleurs, le risque ne peut pas être daté, mais on peut faire des hypothèses sur sa durée et sur le lieu où il pourrait se produire. En revanche, lorsqu'il est effectif, l'événement peut être qualifié par les acteurs d'accident, de crise, désastre ou catastrophe (sous-système *Représentation*). L'événement peut alors être nommé, daté, il a une durée de vie, il s'inscrit dans un lieu et il a une certaine intensité (ce sont ses attributs). Il met en jeu des éléments clairement identifiés.

Tout événement (effectif, probable ou potentiel) est déclenché par un, ou une combinaison d'aléas aux temporalités variables. Si l'événement s'inscrit le plus souvent dans des temporalités courtes (ex : un crash aérien) il peut aussi avoir une durée plus longue (ex : une sécheresse). L'aléa a un statut particulier ; il est le déclencheur de l'événement. L'aléa en présence d'enjeux constitue une menace.

L'événement engendre des dommages. Dans l'ontologie, les dommages « portent sur » les éléments, ce qui explique que la classification des dommages est calquée sur celle des éléments. Les classes intitulées « dommage humain », « dommage aux espèces et au fonctionnement des écosystèmes », « dommage matériel », « dommage au système social », « dommage au patrimoine » « dommage économique » spécialisent la classe Dommage. L'évaluation des dommages obéit souvent à des temporalités différentes. Si les dommages humains et matériels peuvent être rapidement quantifiés, l'évaluation des dommages environnementaux ou sanitaires nécessite plus de temps. Ainsi, concernant l'accident de

gérer l'événement que « l'acteur individuel » (au sens ici de citoyen lambda) (cf. figure 10.4). Comme l'ont démontré [GUM 03] les acteurs organisationnels prennent en charge un ou plusieurs « rôles », assurent différentes « missions » et engagent des « actions », le plus souvent multiples, au sein d'une organisation. Leur capacité à changer de rôle, voire à jouer différents rôles selon les situations, à diversifier leur intervention, les rendent stratégiques et composites [HOY 08]. L'acteur est donc difficile à catégoriser *a priori*. C'est donc davantage la qualification de leur mission qui nous a permis de construire des catégories d'acteurs. Ces dernières ont été construites au regard du cadre national français et pour deux missions essentielles que sont d'une part la prévention des risques et d'autre part la gestion des catastrophes. La capacité de coordination et d'interopérabilité des acteurs n'a pas été ici abordée, cet aspect ayant déjà été analysée dans le cadre du projet ISyCri (*Interoperability of Systems in Crisis Situation*) [BEN 08].

A partir de l'observation du système, les acteurs établissent une « représentation » des événements. Contrairement aux différents acteurs organisationnels, l'acteur individuel, impliqué ou non dans l'événement, développe une représentation personnelle, avant tout basée sur l'affect et l'apprentissage. Cette dernière se place la plupart du temps en dehors de tout cadre réglementaire, de toute norme, de toute évaluation des performances du dispositif de secours etc. Néanmoins, lorsqu'une large part de la population développe une même représentation de l'événement, cela peut faire évoluer la représentation des acteurs organisationnels.

Les acteurs organisationnels œuvrant dans le domaine du risque et de la catastrophe, à savoir :

- les acteurs qui interviennent en matière de secours et de la mise en place de plans particuliers de sûreté (maire, préfet, chef d'établissement...),
- les services opérationnels (le SDIS, le SAMU, les médecins formés à la « médecine de catastrophe », le CODIS...),
- les services de l'Etat qui sont acteurs de la prévention des risques,
- mais aussi les experts, les assureurs, les législateurs, les communicateurs, les associations,

ont des représentations plus codifiées, plus normées, construites par leur organisation, en tenant compte des représentations émanant d'autres organisations. Ces représentations sont en grande partie influencées par des lois, des normes, des règlements qui cadrent l'évaluation de l'événement possible ou réel. Néanmoins elles évoluent en permanence, notamment en fonction des enseignements tirés des différentes expériences vécues (Toulouse 2001, Bâle 1986, etc).

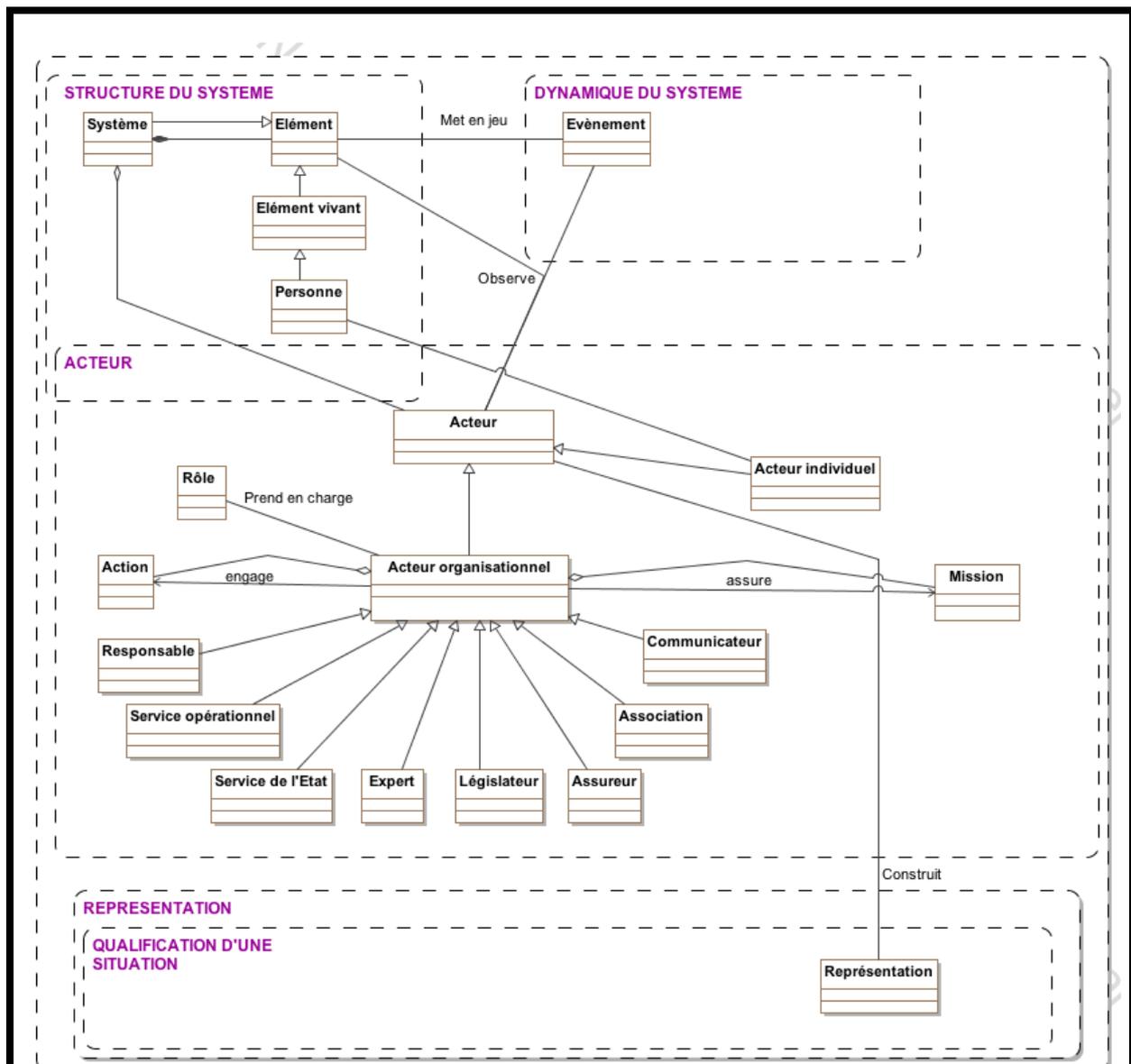


Figure 10.4. Le sous-système Acteur et ses relations avec les sous-systèmes Structure, Dynamique et Représentation

10.3.4. Le système Représentation

Le système *Représentation* permet pour chaque acteur d'expliciter ses critères d'analyse des éléments du système et des événements qui s'y déroulent. On distingue dans les représentations de l'agent :

- la qualification d'une situation,
- le référentiel conceptuel qui définit les notions et les critères qu'utilise l'acteur pour qualifier une situation.

10.3.4.1 Qualification d'une situation

La *qualification d'une situation* s'effectue à partir de la représentation portée par l'acteur sur les éléments et les événements du système (cf. figure 10.5).

Les éléments peuvent être qualifiés par les acteurs « d'élément vulnérable », de « danger », de « source » et de « cible ». Le lien entre élément et élément vulnérable s'effectue par

composition des différentes relations qui passent par le canal de la représentation. Les classes source et cible sont liées de façon indirecte par la classe « Médiateur de l'interaction » qui permet de matérialiser les interactions entre elles [LAN 10]. Une source peut ainsi devenir une cible et *vice-versa*. La classe source généralise la classe danger tandis que la classe cible généralise la classe élément vulnérable. La qualification de ces notions peut varier en fonction du référentiel conceptuel des acteurs.

L'observateur possède également une représentation des événements qu'il qualifie de risque, de risque majeur, d'accident ou d'accident majeur, de crise, de désastre ou de catastrophe en s'appuyant sur son analyse des causes et des effets. Ainsi, si pour de nombreux journalistes l'événement qui s'est produit en 2011 à la centrale de Fukushima est qualifié de catastrophe, les experts du nucléaire parlent d'accident majeur puisque la notion de catastrophe n'existe pas pour qualifier un événement dans le domaine du nucléaire (référence est faite ici à l'Echelle internationale des événements nucléaires).

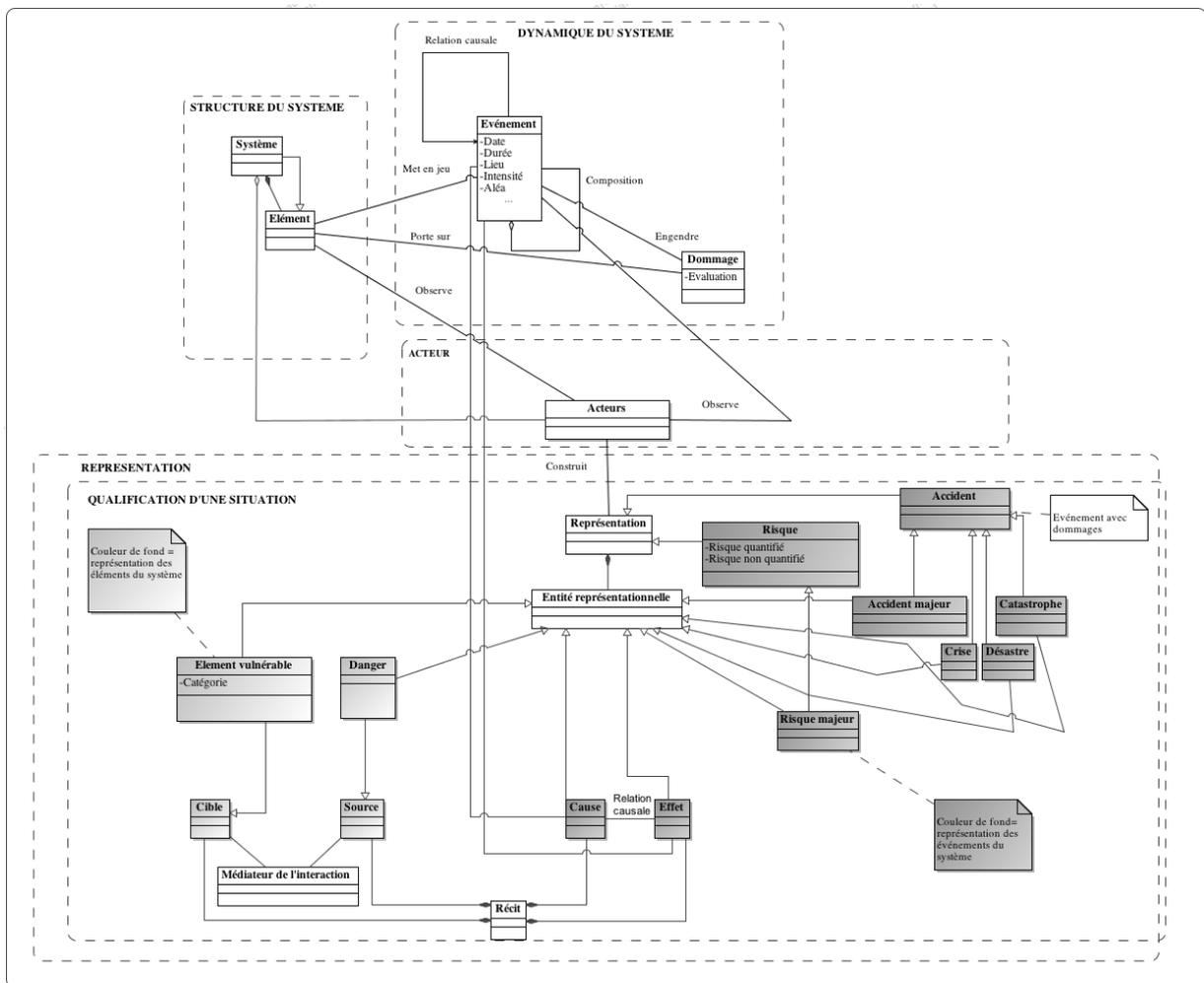


Figure 10.5. Qualification d'une situation et relation avec les sous-systèmes Structure, Dynamique et Acteur

La notion de cause est entendue au sens de l'événement déclencheur qui produit des événements dérivés (et donc des effets). Cette notion est plus générale que l'aléa et permet de s'abstraire de tout vocable scientifique. On distingue ainsi la cause, l'effet et l'expression d'une relation causale entre la cause et l'effet. Prenons un exemple : un événement X provoque un événement Y. X est la cause, « provoque » est l'expression de la relation causale, Y est l'effet. L'événement est donc une cause (événement d'origine) ou un effet

(événement dérivé), selon sa situation dans la chaîne de causalité.

Le « récit » permet d'articuler entre elles les notions de source, de cible, de cause et d'effet. Dans le récit, il y a des effets narratifs dans la façon de retranscrire et d'agencer les événements entre eux. Il peut donc être intéressant de comparer les observables effectifs, le récit qu'on en fait (le passage par l'acteur des observables à leur représentation) et les récits de plusieurs acteurs entre eux. En effet, le récit peut être plus ou moins décalé par rapport aux observables en raison de différents biais qui peuvent intervenir : mise en scène de l'événement, effets narratifs, perceptions etc.

10.3.4.2 Référentiel conceptuel de l'acteur

Le référentiel conceptuel de l'acteur identifie les critères qui permettent de qualifier les éléments et les événements du système (cf. figure 10.6). Ce référentiel correspond au *background* de chaque acteur.

Ainsi, si l'on considère la vulnérabilité, trois critères permettent de considérer qu'un élément est vulnérable. Il s'agit des notions d'exposition, de sensibilité et de résilience [PEL 03]. Ces notions étant polysémiques, nous utilisons ici les définitions les plus usitées. Dans le domaine des risques et des catastrophes, l'exposition est le plus souvent définie en fonction du type d'événement, de son intensité et des éléments du système soumis à la perturbation [ADG 06]. L'espace peut être par exemple identifié comme plus ou moins exposé à l'événement en fonction de la distance séparant la cible de la source de danger. La sensibilité se réfère à la réactivité du système, comme l'alerte précoce, et à sa capacité de résistance [LUE 05], celle par exemple de la résistance physique du bâti lors d'un séisme. Enfin, la résilience peut se définir comme la capacité d'un élément à se remettre d'une perturbation ([KLE 03], [TIM 81]).

De même, les critères d'acceptabilité permettent de statuer sur l'acceptabilité de l'accident et du risque. L'acceptabilité est une construction sociale [DOU 82], qui varie selon les acteurs et leurs critères de choix.

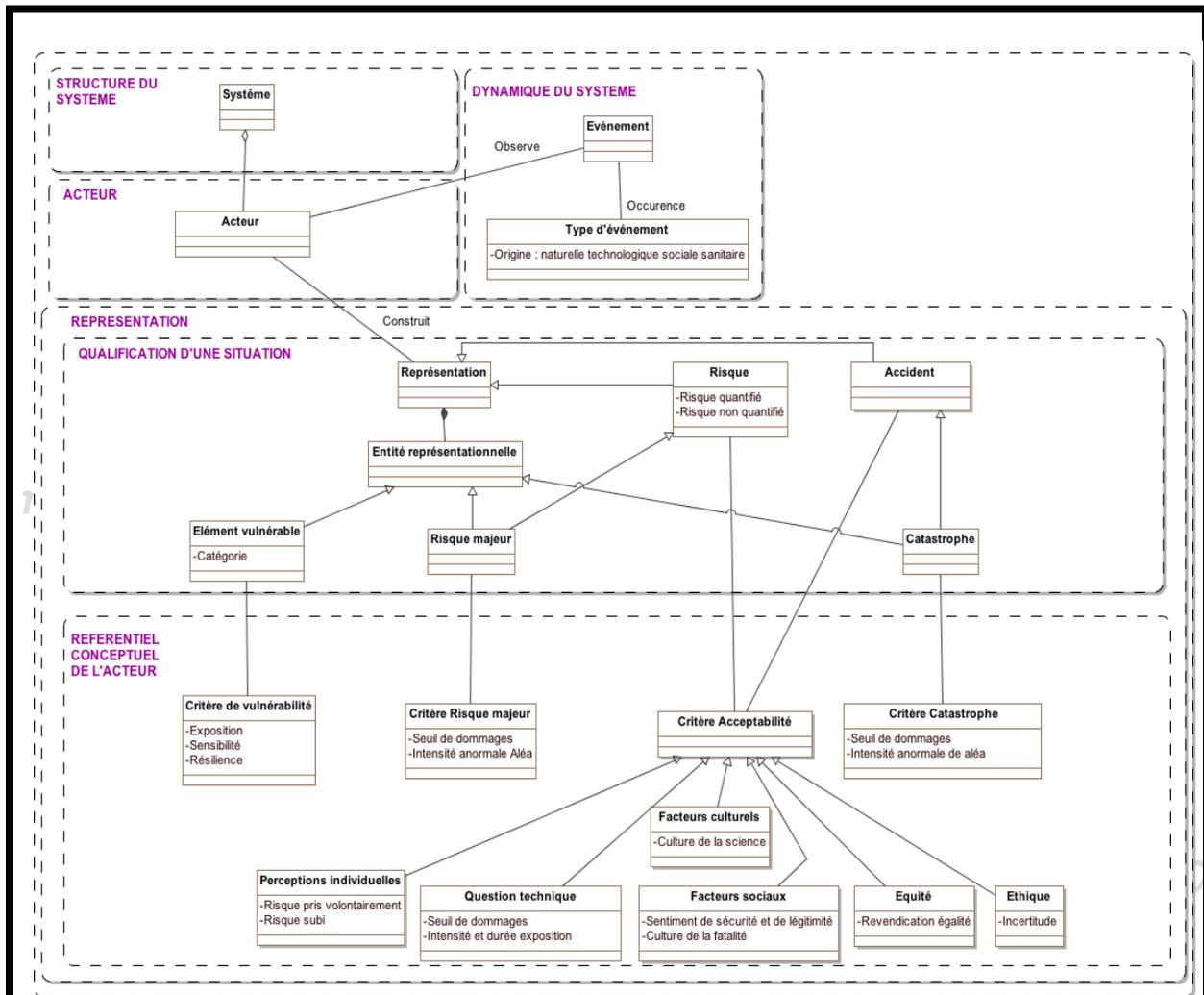


Figure 10.6. Référentiel conceptuel de l'acteur

L'acceptabilité est donc vue sous des angles différents :

- les perceptions individuelles : un accident subi est rarement accepté à l'inverse d'un accident résultant de risque pris volontairement,
- l'évaluation de seuils permettant de déterminer ce qui est acceptable pour la société. Ces seuils peuvent notamment être établis à partir de la gravité des dommages, de l'intensité du phénomène et de la durée de l'exposition,
- la question sociale renvoie au sentiment de sécurité face à l'accident et de légitimité de l'égalité face aux événements,
- la question culturelle renvoie à la culture de la fatalité ou de la science face à l'accident et à la catastrophe,
- la question de l'équité renvoie à la revendication de l'égalité face aux catastrophes. La Nouvelle-Orléans inondée lors de l'ouragan Katrina témoigne d'une société américaine inégalitaire [MAN 06], société où les inégalités dans la reconstruction perdurent encore aujourd'hui,
- les préoccupations éthiques à l'égard des accidents dans nos sociétés sont notamment liées à l'incertitude scientifique des conséquences de certains accidents (de type nucléaire par exemple) sur le plan de la santé et de l'environnement.

Les acteurs ont également une représentation du risque acceptable. L'acceptabilité du

risque agit sur le choix d'exposition ou non à l'aléa [GIL 03]. On peut cependant noter qu'en France et dans de nombreux pays de l'Europe, le risque accepté est mal défini par la loi. De même que pour un accident, les pays décident de l'acceptabilité du risque à partir de paramètres nationaux. Ces derniers sont relatifs aux perceptions individuelles, aux facteurs sociaux et culturels, à l'éthique et l'équité, à la gravité des dommages.

10.4. Premier exercice de validation de l'ontologie factuelle à partir du récit du Grand Séisme de Kantô (1923)

Pour valider cette ontologie, nous avons réalisé la spécialisation de la partie factuelle de celle-ci en prenant pour cas d'étude le Grand Séisme de Kantô qui s'est produit au Japon en 1923. On appelle ontologie factuelle la partie de l'ontologie conceptuelle qui permet de décrire la structure et la dynamique d'un système. L'instanciation complète peut être lue dans [PRO 09]. Avec le séisme de Kobé en 1995 et celui qui affecta particulièrement Tohoku et Fukushima en 2011, le Grand Séisme de Kantô de 1923 est parmi les plus puissants survenus au Japon et dans le monde. Si l'on est aujourd'hui en mesure de produire un bilan chiffré et objectif de cette catastrophe, peu de documents font la synthèse du déroulement de l'événement. L'ouvrage « Tokyo séisme, 60 secondes qui vont changer le monde » [HAD 92] a été choisi pour valider l'ontologie car il décrit de façon précise les faits et non les prises de position ou les jugements portés sur l'événement par les acteurs. L'ontologie est donc utilisée ici comme une méthode d'analyse *a posteriori* de la catastrophe [DUB 12].

10.4.1. Présentation du cas d'étude : le grand séisme de Kantô, 1923

Le grand tremblement de terre qui frappa la région de Kantô le 1^{er} septembre 1923 un peu avant-midi entraîna des milliers de morts et engendra de graves dommages dans les villes de Yokohama et de Tokyo. Les ondes de choc d'une durée inférieure à 1 minute détruisirent les 2/3 de Tokyo et les 4/5^{ème} de Yokohama. De nombreux incendies se déclarèrent dans les deux villes, car l'événement se produisit au moment où les habitants commençaient à chauffer leurs braseros. A Tokyo, ceux-ci enflammèrent les maisons en bois, des dépôts et des réservoirs de gaz et d'hydrocarbures explosèrent, des canalisations de gaz se rompirent et les ruptures de canalisations d'eau rendirent impossible les secours anti-incendie. A l'époque, Tokyo, capitale d'un pays peu développé, compte 2,5 millions d'habitants. L'économie japonaise, à dominante agricole, fut lourdement frappée. On estima à 9 000 le nombre d'usines détruites par le feu. Il y eut plus de 120 000 victimes, soit à la suite d'écroulement de bâtiments, soit du fait d'incendies ou de mouvements de panique.

10.4.2. Un premier exercice de validation par spécialisation des concepts génériques

La première étape a consisté à analyser le récit sur « Le grand séisme de Kantô » afin d'extraire les termes qui spécialisent les classes « Élément », « Événement » et « Dommage » de l'ontologie conceptuelle (cf. figures 10.7 et 10.8). Par exemple, une rupture de faille est une sorte d'événement ; un pont est une sorte d'infrastructure.

Pour les besoins de la description, les concepts de « Ville » et de « Quartier » spécialisent la notion de système (nous les considérons donc comme des systèmes particuliers eux-mêmes composés d'éléments). Cette structuration de l'information nous permet d'avoir une approche multi-échelle de la catastrophe, chaque niveau spatial apportant un éclairage différent de l'événement. Nous avons donc différentes descriptions à l'échelle d'une ville, d'un quartier

ou d'un ensemble de quartiers composant une ville (cf. figure 10.7).

Les éléments sur lesquels portent les événements sont les classes « Maison », « Place libre » et « Pont » pour la classe « Infrastructure diverse » ; la classe « Fleuve » pour celle nommée « Elément physique » ; la classe « Personne » pour « Elément vivant » (cf. figure 10.7). Les classes « Rupture de faille », « Tremblement de terre », « Allumage de braseros », « Incendie », « Eroulement de maison », « Rassemblement », « Fuite » et « Ecrasement » spécialisent la classe « Evénement » (cf. figure 10.8). La classe « Dommage humain » est spécialisée dans les classes « Blessure », « Mort », « Blessés » et « Morts », tandis que la classe « Dommage matériel » généralise les classes « Destruction maison », « Destruction maisons » et « Destruction pont » (cf. figure 10.8).

On voit apparaître de façon explicite la complexité du système du fait du nombre et de la variété des composants, de la présence de composantes individuelles et collectives : le concept générique « Dommage humain » peut concerner une personne (mort, blessure) ou une population (morts, blessés) selon les niveaux d'analyse ; de même la classe « Dommages matériel » peut généraliser la destruction d'une maison ou d'un pont bien particulier, de plusieurs maisons à l'échelle d'un quartier ou d'une ville. Implicitement, la complexité est aussi engendrée par l'imbrication de divers niveaux d'organisation [PAV 94]. La classe « Rassemblement » par exemple peut être le résultat de l'agrégation ou au contraire de l'auto-organisation d'individus.

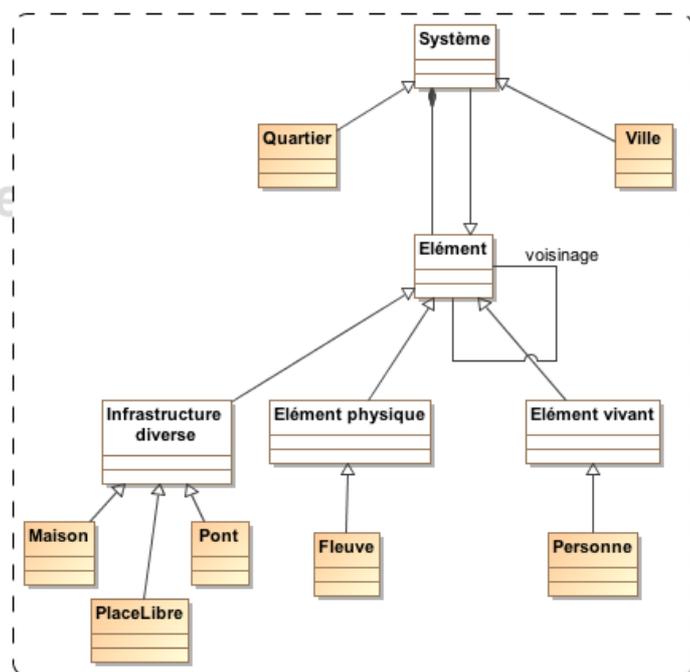


Figure 10.7. La spécialisation de la structure du système

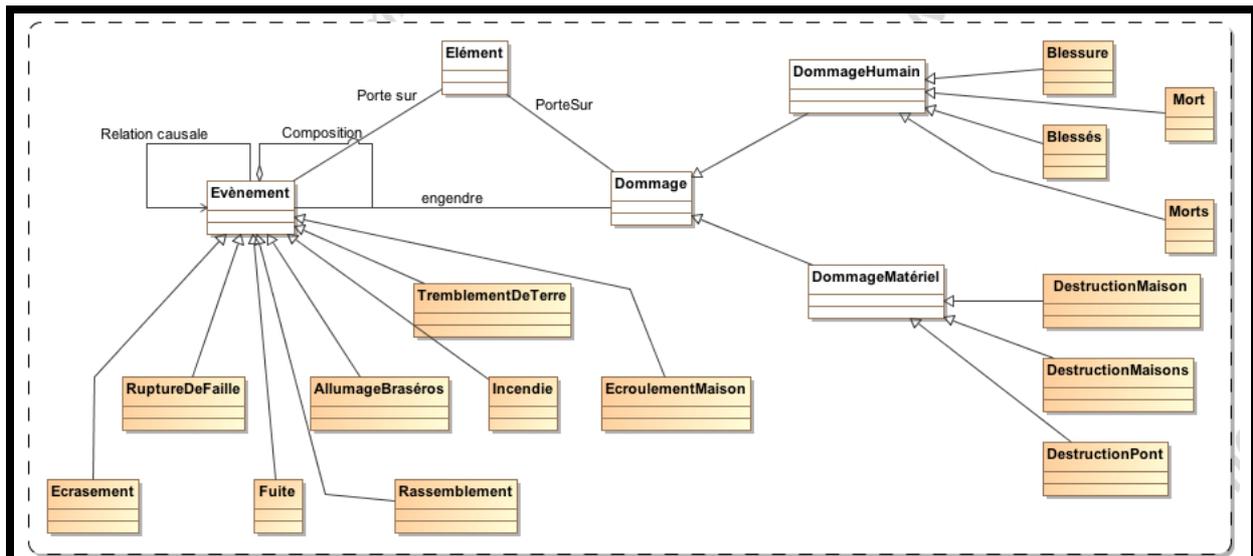


Figure 10.8. La spécialisation de la dynamique du système

On remarquera que la complexité due à l'imbrication de niveaux spatiaux apparaît clairement sur la structure du système mais est moins directement visible dans le déroulement des événements. Ce constat trouve son explication :

- dans la composition même de l'ontologie qui fait que l'évènementiel se rapporte à la structure,
- dans la non prise en compte explicite des interactions régissant chaque type d'évènement. Ces interactions sont le plus souvent à l'origine de l'émergence de nouvelles propriétés, notamment dans le domaine des catastrophes [PRO 09]. Chaque type d'évènement identifié est donc le résultat d'un processus d'interaction.

10.5. Conclusion et perspectives

L'ontologie présentée ne peut être considérée comme le modèle unique de représentation du domaine des risques et catastrophes, mais davantage comme un modèle actuel et partagé de représentation des connaissances. Cette ontologie n'a pas non plus vocation à être figée.

Néanmoins, il apparaît déjà que construire une ontologie constitue un exercice important pour le thématicien. Il oblige à dessiner l'ensemble du « ciel sémantique qui éclaire un domaine » c'est-à-dire identifier, clarifier, définir voir redéfinir les concepts utilisés régulièrement et qualifier les relations qui les unissent.

L'ontologie constitue également un outil destiné à faciliter la discussion entre des acteurs aux horizons disciplinaires variés ; elle favorise l'unification du sens des termes relevant du domaine d'étude et permet de discuter des liens entre les différents concepts. Elle constitue donc un outil de communication.

Enfin, la réalisation d'une ontologie conceptuelle présente l'avantage de proposer un cadre facilitant la comparaison d'évènements de même nature (comparaison des trois séismes majeurs intervenus au Japon depuis le début du XX^{ème} siècle), de nature différente mais portant sur un même territoire (les risques en Haute-Normandie) ou complètement indépendants (comparaison des dommages liés aux inondations et aux tremblements de terre dans le monde).

En l'état, l'ontologie présentée répond à deux objectifs principaux :

- la description factuelle d'un événement possible où réel situé dans un cadre précis,
- la prise en compte des acteurs et leurs représentations de l'événement contextualisé. Les notions de risque majeur, d'accident, de catastrophe, ainsi que bien d'autres notions associées, sont en effet de l'ordre de la représentation que se font les acteurs des événements. Les représentations sont construites en fonction d'un référentiel conceptuel constitué de critères qui varient selon les acteurs (individus, organisations institutionnelles ou pas).

Toutefois, cette ontologie présente également des points faibles. L'une des principales limites est relative actuellement à l'absence de validation du sous-système *Représentation*. Il conviendra donc dans un travail ultérieur de tester la globalité du modèle conceptuel à partir de l'instanciation d'une catastrophe passée ayant par exemple fait l'objet d'un ou de plusieurs récits. Ceci nous permettra à la fois de mettre à l'épreuve notre ontologie et d'interroger le processus de validation.

La deuxième limite est relative à l'absence de prise en compte détaillée des actions et missions des acteurs. Ces actions peuvent avoir trait notamment au domaine de la prévention individuelle ou collective et à la gestion de catastrophe. Elles ont la particularité de modifier, d'agir sur la dynamique des événements et la structure des éléments du système et par voie de conséquence, de rétroagir sur la vulnérabilité des éléments, sur le risque etc. Par exemple, de l'acceptabilité du risque découle la mise en place de mesures visant à réduire l'exposition au risque/source (délimiter des zones où l'urbanisation est interdite, soumise à réglementation etc.) et les effets potentiels du risque. Relativement à nos perspectives de recherche, nous souhaitons donc intégrer, dans le modèle conceptuel sus présenté, un sous-système relatif aux actions des acteurs et leurs effets sur le système et ses représentations.

Enfin, cette ontologie devra être complétée, notamment en intégrant un sous système permettant d'analyser les différents types de comportements humains qui émergent dans les situations d'accident ou de catastrophe et leurs mécanismes de production (causalité, auto-organisation, agrégation, imitation).

Remerciements : Les auteurs remercient vivement l'Agence Nationale pour la Recherche, ANR (projet CO-SMA-GEMS) pour avoir facilité la réalisation de ce travail. Nous remercions Christophe Sibertin Blanc pour ses nombreuses relectures et la richesse de ses remarques et Patrice Langlois pour ses discussions toujours stimulantes.

Bibliographie

- [ADG 06] ADGER W.N., « Vulnerability », *Global Environmental Change*, 16 (3), p. 268-281, 2006.
- [BEC 09] BECERRA S., PELTIER A., *Risques et environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés*, Paris, L'Harmattan, 2009.
- [BEN 08] BENABEN F., HANACHI C., MATTHIEU L., COUGET P., CHAPURLAT V., « A Metamodel and its Ontology to Guide Crisis Characterization and its Collaborative Management », *5th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management (ISCRAM)*, Washington, DC, USA, May 2008.
- [BLA 94] BLAIKIE P., CANNON T., DAVIS I., WISNER B., *At risk : natural hazards, people's vulnerability and disasters*, London New York, Routledge, 1994.
- [BOL 12] BOLAY J.C., SCHMID M., TEJADA G. ET HAZBOUN E. (eds), *Technologies and Innovations for Development. Scientific Cooperation for a Sustainable Future*, Springer Verlag, France, 2012.
- [COM 07] COMBE C., *La ville endormie ? Le risque d'inondation à Lyon. Approche géohistorique et systémique du risque de crue en milieu urbain et périurbain. Thèse de doctorat de géographie, Université Lumière Lyon 2, 2007.*
- [CRA 99] CRANEFIELD S., PURVIS M., « UML as an ontology modelling language », *Proc. of the Workshop on Intelligent Information Integration, 16th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-99)*, 1999, Available : <http://www.aifb.uni-karlsruhe.de/WBS/dfc/iii99/crainfield-ijcai99-iii.pdf>
- [CUT 00] CUTTER S.L., MITCHELL, J.T., SCOTT M.S., « Revealing the vulnerability of people and places : a case study of Georgetown country, South California », *Annals of the Association of American Geographers*, 90 (4), p. 713-737, 2000.
- [D'ER 09] D'ERCOLE R., METZGER P., « La vulnérabilité territoriale : une nouvelle approche des risques en milieu urbain », *Cybergeo : European Journal of Geography*, article 447, 2009.
- [DAU 09] DAUDE E., PROVITOLLO D., DUBOS-PAILLARD E., GAILLARD D., ELIOT E., LANGLOIS P., PROPECK-ZIMMERMANN E., SAINT-GERAND T., « Spatial risks and complex systems : methodological perspectives », in M.A. Aziz-Alaoui, C. Bertelle (dir.), *From System Complexity to Emergent Properties*, Springer-Verlag, Series understanding complex systems, Berlin Heidelberg, p.165-178, 2009.
- [DAU 13] DAUPHINE A., PROVITOLLO D., *Risques et catastrophes. Observer, spatialiser, comprendre, gérer*, (2^{ème} Ed), Armand Colin, Paris, 2013.
- [DOU 82] DOUGLAS M., WILDAWSKI A., *Risk and culture : An essay on the selection of technological and environmental dangers*, Berkeley, University of California Press, 1982.
- [DUB 12] DUBOS-PAILLARD E., PROVITOLLO D., « Analysis of the 2011 Japan's triple disaster from a conceptual ontology of the domain of risk and disaster », *3rd International Conference on Complex Systems Design & Management*, Paris, France, décembre 2012.
- [GIL 03] GILBERT C., *Risques collectifs et situations de crise. Apport de la recherche en sciences humaines et sociales*, Collection Risques Collectifs et Situations de Crise, l'Harmattan, Paris, 2003.
- [GRÜ 93] GRÜBER T.R., « Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing », in N. Guarino and R. Poli, (Eds.), *International Workshop on Formal Ontology*, Padova, Italy, 1993. In *International Journal of Human-Computer Studies*, Volume 43(5-6), p. 907-928, 2005.
- [GUM 03] GUMUCHIAN H., GRASSET E., LAJARGE R., ROUX E., *Les acteurs, ces oubliés du territoire*, Paris, Éditions Economica, Coll. Géographie, Anthropos, 2003.
- [HAD 92] HADFIELD P., *Tokyo séisme : 60 secondes qui vont changer le monde*, Autrement, Paris, 1992.
- [HOL 04] HOLLNAGEL E., *Barriers and accident Prevention*, Hampshire, Ashgate, 2004.
- [HOY 08] HOYAUX A.F. ET AL., *Atelier Acteurs - Peut-on parler d'un tournant actoriel ? Synthèse collective*, 2008, http://eso.cnrs.fr/TELECHARGEMENTS/revue/ESO_27/3atelier_acteurs.pdf
- [KLE 03] KLEIN R.J.T., R.J. NICHOLLS, F. THOMALLA F., « Resilience to natural hazards : How useful is this concept ? », *Environmental Hazards*, 5, p. 35-45, 2003.
- [LAN 10] LANGLOIS P., *Simulation des systèmes complexes en géographie. Fondements théoriques et application*, Lavoisier, Hermes France, 2010.
- [LEV 03] Leveson, N., *A New Approach to System Safety Engineering*, Aeronautics and Astronautics Department, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA : MIT. <http://sunnyday.mit.edu>, 2003.
- [LUE 05] LUERS A., « The surface of vulnerability : an analytical framework for examining environmental change », *Global*

Environmental Change 15, p. 214-223, 2005.

[MAN 06] MANCEBO F., « Katrina et la Nouvelle-Orléans : entre risque "naturel" et aménagement par l'absurde », *Cybergeogeo*, article 353, 2006.

[MAR 08] MARET I., CADOUL T., « La reconstruction de la Nouvelle-Orléans, participation citoyenne et planification durable », in Antoine Da Lage & al. *Dans L'après-développement durable : espaces, nature, culture et qualité*, Paris, Ellipses, 2008.

[NOV 06] NOVEMBER V., « Le risque comme objet géographique », *Cahiers de géographie du Québec*, 50 (141) p. 289-296, 2006.

[PAV 94] PAVÉ A., *Modélisation en biologie et en écologie*, Lyon, Aléas, 1994.

[PEL 03] PELLING M., *The vulnerability of cities : Natural disaster and social resilience*, Earthscan, London, UK, 2003.

[PIG 05] PIGEON P., *Géographie critique des risques*, Economica, Paris, 2005.

[PRO 07] PROVITOLLO D., « La vulnérabilité aux inondations méditerranéennes : une nouvelle démarche géographique », p. 23-40, *Annales de Géographie*, 2007.

[PRO 09] PROVITOLLO D., « A new classification of catastrophes based on "Complexity Criteria" », in M.A. Aziz-Alaoui, C. Bertelle (dir.), *From System Complexity to Emergent Properties*, Springer-Verlag, Series understanding complex systems, Berlin Heidelberg, p. 179-194, 2009.

[PRO 09] PROVITOLLO D., MÜLLER J.P., DUBOS-PAILLARD E., « Validation of an ontology of risk and disaster through a case study of the 1923 Great Kanto Earthquake », *3rd International Conference on Complex System and Applications*, Le Havre, Juillet 2009.

[QUR 08] QURESHI Z.H., *A review of Accident Modelling approaches For Complex Critical Sociotechnical Systems*. DSTO : Commonwealth of Australia, 2008.

[REG 12] REGHEZZA-ZITT M., *Paris coule-t-il ?* Hachette, Paris, 2012.

[RUF 08] RUFAT S., *Transition post-socialiste et vulnérabilité urbaine à Bucarest*, thèse de doctorat, ENS de Lyon, 2008.

[RUI 10] RUIN I., « Conduite à contre-courant et crues rapides, le conflit du quotidien et de l'exceptionnel », *Annales de géographie*, vol 4, n° 674, 2010.

[SAH 11] SAHAL A., *Le risque de tsunami en France : contribution méthodologiques pour une évaluation intégrée par scénarios de risque*. Thèse de doctorat de géographie, Université Panthéon-Sorbonne, Paris, 2011.

[SCH 09] SCHILDERINCK G., *Drought Cycle Management in arid and semi-arid Kenya. A relevant disaster risk reduction*, Catholic Organisation for Development and Emergency Aid (CORDAID), 2009.

[SER 12] SERRE D., BARROCA B., LAGANIER R., *Resilience and Urban Risk Management*, Netherlands, CRC Press, 2012.

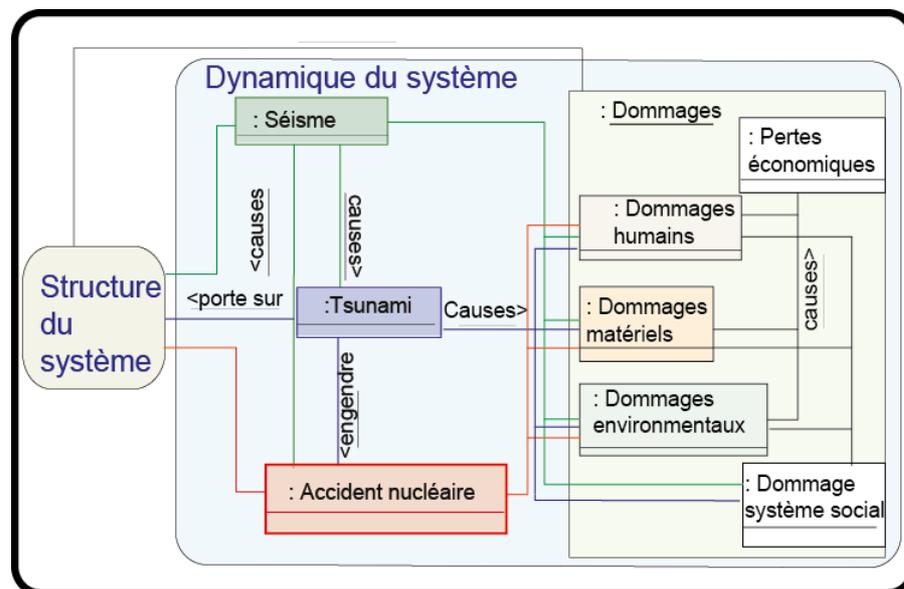
[TIM 81] TIMMERMAN P., « Vulnerability, Resilience and the collapse of society : a review of models and possible climatic applications », University of Toronto, Canada, 1981.

[WIS 04] WISNER B., BLAIKIE P., CANNON T., DAVIS I., (2^{ème} eds), *At Risk : natural hazards, people's vulnerability and disasters*, Routledge, London, 2004.

3.2. L'ontologie appliquée à la triple catastrophe du Japon

Cette ontologie a également été validée à partir de l'étude de la triple catastrophe de Fukushima (Japon) qui s'est produite le 11 mars 2011 (Dubos-Paillard et Provitolo, 2012, 2013). L'instanciation a été réalisée à partir des éléments mis à disposition du public, en prenant pour objet d'analyse l'enchaînement d'évènements, composés d'un tremblement de terre, d'un tsunami et d'un accident nucléaire (Fig. 8).

Figure 8 - La représentation synthétique de l'ontologie factuelle appliquée à l'accident de Fukushima (Source : d'après Dubos-Paillard et Provitolo, 2012 et 2013)



S'il est aisé de définir le moment du début de l'évènement, c'est-à-dire le 11 mars 2011 à 14h46, l'exercice est plus délicat concernant sa fin. Selon le gouvernement japonais, elle correspondrait au 16 décembre 2011, date où la procédure « d'arrêt à froid » des réacteurs est effective, mais cette date est loin de faire l'unanimité. Il existe de nombreuses sources d'information sur la catastrophe (articles de journaux en français et en anglais, articles académiques, rapports, films et vidéos amateurs) qui apportent des éléments intéressants et complémentaires. Ces sources diversifiées, que nous avons récoltées durant six mois, jusqu'en septembre 2011 du fait de l'arrêt des bulletins réguliers d'information, fournissent des informations textuelle, visuelle et sonore sur la violence de l'évènement, sa dynamique temporelle et permettent de restituer la façon dont le territoire et les populations ont fait face à l'évènement. Le diagramme présenté ici en propose une synthèse (Fig. 9). L'analyse ne couvre cependant pas toute la période, elle se limite aux sept premiers jours durant lesquels les émissions de radioactivité de la centrale de Fukushima Daiichi ont été les plus fortes. Elle ne présente pas non plus dans le détail comment les secours, les experts et les élus ont fait face aux différents évènements.

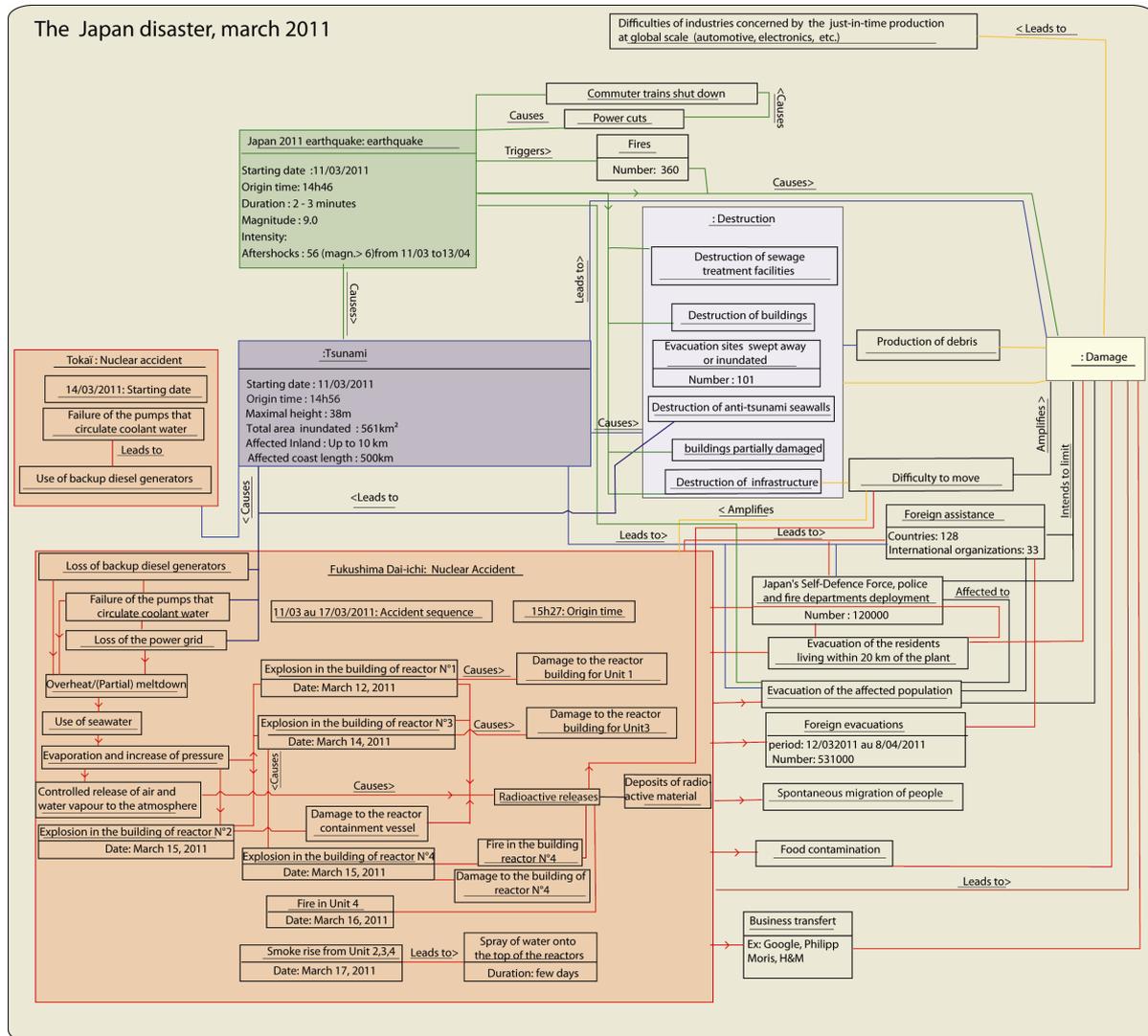
L'analyse de la figure¹¹ montre à quel point la description de ce qui s'est produit est complexe. Complexe, par les nombreux territoires mis en jeu et par la multiplicité des évènements qu'il faut mobiliser pour expliquer l'ampleur de la catastrophe. L'ontologie a permis de mettre en avant :

- une portée de la catastrophe qui va du local au global,
- la complexité des enchaînements d'évènements qui affectent le territoire et la centrale de Fukushima Daiichi,
- des déplacements massifs de population avec des mouvements de panique,

¹¹ Le diagramme objet a été simplifié et retravaillé pour faciliter sa lecture.

- une évaluation des dommages difficile à réaliser.

Figure 9 – Les enchaînements d'évènements observés durant la triple catastrophe de Fukushima – mars 2011 (image issue de l'ontologie complète) (Source : Dubos-Paillard et Provitolo, 2012, 2013)



N.B. The object diagram has been simplified and reworked for easier reading.

- Tsunami-related links
- Earthquake-related links
- Nuclear accident-related links
- Tsunami+earthquake-related links
- Tsunami+earthquake+nuclear accident-related links
- Causes> Qualification of the relation

De nombreux liens existent entre les éléments et les évènements, entre les différents évènements, entre les évènements et les dommages mais aussi entre les dommages et les éléments sur lesquels ils portent. La réalisation de cette synthèse graphique impose une compréhension approfondie du cas étudié. Elle est également porteuse d'informations peu mises en avant, mais essentielles en matière de résilience. Au-delà de la question liée à la hauteur des murs antitsunamis, la nécessité de maintenir en état de service un certain nombre d'infrastructures de transport autour d'une centrale nucléaire et de protéger davantage les systèmes de secours constituent des enseignements importants en matière de réduction des vulnérabilités biophysiques et territoriales face à un évènement nucléaire.

Conclusion

Pour conclure, la diversité des risques et des catastrophes, tant dans leur nature que leur temporalité et spatialité, a amené à tester l'ontologie conceptuelle à partir de l'instanciation de deux catastrophes passées ayant fait l'objet de plusieurs récits complémentaires. Elle a donc été utilisée dans les deux cas présentés sur le Japon comme une méthode d'analyse *a posteriori* des catastrophes. Elle a permis de révéler systématiquement que toute l'ambiguïté des aléas est d'être à la fois « cause et conséquence » d'un évènement, ce que nous avons désigné dans nos travaux sous le terme de « source ou cible ». Ce modèle permet de décrire les processus sans qu'il ait pour autant de capacité prédictive. Toutefois, nous avons montré comment, dans le cas du séisme de Kantô de 1923, la diffusion des incendies à partir de deux foyers majeurs aboutit à l'encerclement d'une place où s'était réfugiée une partie de la population. Cette diffusion a transformé un lieu présumé sûr en lieu catastrophique, et de manière très faiblement prévisible. L'ontologie pourrait également être utilisée pour mener une analyse proactive des risques en testant différents scénarios prospectifs. L'exploitation d'anciennes analyses d'évènements (accident, catastrophe) peut fournir aux experts des cas sur lesquels s'appuyer pour réaliser des études actuelles d'analyse de risque, des simulations expérimentales. L'ontologie conceptuelle peut ainsi permettre « d'imaginer » des évènements qui pourraient se produire sur des territoires spécifiques et d'identifier, à partir de cette connaissance territoriale, les effets potentiels de dominos. L'espace et le territoire agissent sur les risques, soit par leurs propriétés physico-biologiques, soit par l'action de la société et des décideurs politiques qui les gèrent, les managent. L'ontologie peut ainsi aider 1) à la mise en évidence des relations et interactions entre risque(s) et territoire(s), 2) à la prise de décision en attirant l'attention sur les limites des politiques qui cherchent à prévenir les catastrophes, comme sur l'intérêt d'éviter une approche purement structurelle et monorisque.

En revanche, les modélisations conceptuelles et ontologiques sont moins adaptées à l'étude des dynamiques spatio-temporelles des comportements des populations en prise avec des menaces. Nous avons donc recours à la modélisation mathématique pour dépasser cette limite (cf. partie 2).

Publications et communications majeures (par ordre chronologique, selon la codification utilisée dans la liste complète des publications fournie dans le volume 1)

Je suis coauteur avec mon collègue A. Dauphiné, d'un ouvrage de référence sur les risques et les catastrophes (2^{ème} eds., Dauphiné, Provitolo, 2013) et j'ai publié en français et en anglais différents articles de revues et chapitres d'ouvrage venant enrichir le débat interdisciplinaire sur les sens donnés aux concepts de vulnérabilité et de résilience, sur les relations tissées entre ces concepts et sur les cadres méthodologiques pouvant être mobilisés pour les décrire.

J'ai retracé la généalogie du concept de résilience, son usage dans différentes disciplines et publié, dès 2007, un article intitulé « La résilience : un concept pour la gestion des risques » mettant en lumière l'intérêt de mobiliser ce concept dans le cadre de la prévention des risques et de la gestion des catastrophes (Dauphiné et Provitolo, 2007 et 2013 ; Provitolo, 2012). Ces recherches m'ont amenée à participer et à être invitée aux séminaires de recherche sur la résilience organisés par l'Ecole Normale Supérieure de Paris et à copublier, avec mes collègues géographes de l'ENS et de l'Université Paris-Est Créteil, une cartographie des usages de cette notion appliquée aux domaines des risques et des changements climatiques (Provitolo et Reghezza, 2015 ; Reghezza, Provitolo, Lhomme, 2015), cartographie que j'ai affinée au regard des trois moments de la résilience : celle après le choc, celle avant choc et celle durant le choc (Provitolo *et al.* 2017). Ces recherches ont été complétées par la réalisation d'une ontologie du domaine des risques et catastrophes.

Menées depuis une dizaine d'années, elles sont valorisées dans le cadre de conférences scientifiques (nationales et internationales), certaines en tant qu'*Invited Speaker* (Roumanie, Liban, France, Canada), de différentes universités d'été ou d'écoles chercheurs CNRS, INRA ou dédiées aux questions de résilience des villes et des populations, ainsi que de conférences à destination du grand public.

A.34 – 2013 – 1 - Dauphiné A., Provitolo D., (2013), *Risques et catastrophes – Observer, spatialiser, comprendre, gérer*, A. Colin (2^{ème} édition), Collection U, 412 p.

A.28 – 2017 – 1 - Provitolo D., Serre D., Boschetti L., (2017), « Toward a process of resilience implementation : capacities, models and strategies », In : *Floods : Vol 1- Risk knowledge*, Eds F. Vinet, Elsevier.

A.25 – 2016 – 1 - Provitolo D., (2016), « La résilience sociétale : cadres conceptuels et méthodologiques », In : *Résilience, vulnérabilités des territoires et génie urbain*, Eds B. Landau et Y. Diab, Presses des Ponts, Les carrefours du génie urbain.

A.22 – 2015 – 4 - Provitolo D., Reghezza M., (2015), « Resilience and vulnerability : from opposition towards a continuum », In : *Resilience Imperative – Uncertainty, Risks and Disasters*, Eds Reghezza-Zitt et Rufat, Iste Press.

A.21 – 2015 – 3 - Reghezza M., Lhomme S., Provitolo D., (2015), « Defining resilience : when the concept resists », In : *Resilience Imperative – Uncertainty, Risks and Disasters*, Eds Reghezza-Zitt et Rufat, Iste Press.

A.18 – 2014 – 1 - Provitolo D., Dubos-Paillard E., Müller J.-P., (2014), « Une ontologie conceptuelle du domaine des risques et catastrophes », In : *Ontologies et modélisation par SMA en SHS*, D. Phan (eds), Hermes, Lavoisier, 558 p. (résultat de l'ANR *Cosmagems*).

- B.20-2012-1-** Dubos-Paillard E., **Provitolo D.**, (2012), « Analysis of the 2011 Japan's triple disaster from a conceptual ontology of the domain of risk and disaster », *Complex System and Design Management*, décembre 2012, Paris.
- A.17 – 2013 – 1 - Provitolo D.**, (2013), « Resiliency vulnerability notion - Looking in another direction in order to study risks and disasters », In : *Resilience and urban risk management*, Serre D., Barroca B., Laganier R. (Eds.), CRC Press, Taylor and Francis Group
- A.16 – 2012 – 2 Provitolo D.**, (2012), « The Contribution of Science and Technology to meeting the Challenge of Risk and Disaster Reduction in Developing Countries : From Concrete Examples to the Proposal of a Conceptual Model of « Resiliency Vulnerability », In : J.-C. Bolay et al. (eds), *Technologies and Innovations for Development*, Springer-Verlag.
- A.9 – 2007 – 2 - Dauphiné A., Provitolo D.**, (2007), « La résilience : un concept pour la gestion des risques », pp.115–125, n°654, *Annales de Géographie*.
- A.8 – 2007 – 1 - Provitolo D.**, (2007), « La vulnérabilité aux inondations méditerranéennes : une nouvelle démarche géographique », *Annales de Géographie*, n°653, pp. 23–40.
- B.16-2009-2- Provitolo D.**, Müller J.-P., Dubos-Paillard E., (2009), « Validation of an ontology of risk and disaster through a case study of the 1923 Great Kanto Earthquake », *ICCSA Proceedings Special Sessions*, pp. 140-150, 3rd International Conference on Complex Systems and Applications, Le Havre (France).
- CI.20-2017-4- Provitolo D.**, (2017), « Resilience-based practices in the Field of Society and Nature », *Symposium International RESILIO*, Bucharest, Roumanie, 27-29 octobre 2017.
- CI.18-2017-2- Provitolo D.**, (séance plénière avec B. Cyrulnik, E. Philippe, S. Maire et Y. Jebrak) (2017), « La résilience au cœur des mutations des politiques publiques en général et de l'ingénierie publique en particulier », *Rencontres nationales de l'ingénierie territoriale : Résilience et territoire*, 1-2 juin 2017, Le Havre, France.
- CI.11-2014-3- Provitolo D.**, (2014), « Analyse des risques au regard de la résilience », Séminaire thématique du LIED –Laboratoire Interdisciplinaires des Energies de Demain-, 14 janvier 2014, Campus Paris Diderot.
- CI.3-2009-1- Provitolo D.**, (2009), « Vulnérabilité et résilience, géométrie variable de deux concepts », *Séminaire de recherche sur la Résilience Urbaine, Ecole Normale Supérieure*, Novembre 2009, Paris-ULM (France), 2009.

PARTIE 2

DES MODELISATIONS DES CATASTROPHES ET DES COMPORTEMENTS HUMAINS SOUS LA FORME DE SYSTEMES DYNAMIQUES

Introduction - Des choix de modélisation des systèmes dynamiques

Un système dynamique est un ensemble de variables en interaction qui évoluent dans le temps. Pour modéliser de tels systèmes, il existe plusieurs voies : les équations différentielles, les automates cellulaires et les systèmes multi-agents, voire même les modèles statistiques de chroniques.

Pour comprendre l'évolution des catastrophes urbaines, des paniques collectives, puis plus récemment des changements d'états comportementaux, j'ai mobilisé les modèles d'équations différentielles ordinaire : une équation différentielle modélise l'évolution d'une variable. La solution de cette équation permet de dessiner sa trajectoire, son mouvement. Ces modèles présentent des apports et des limites.

Les apports et les limites des modèles d'équations différentielles ordinaires pour comprendre l'évolution des risques, des catastrophes et des comportements humains

Premier avantage, les modèles d'équations différentielles ordinaires (EDO) sont construits en partant des facteurs et processus qui rendent compte de l'évolution d'un phénomène. Ce sont donc des modèles explicatifs et souvent théoriques, construits à partir de connaissances fondamentales que le géographe puise dans les travaux de ses devanciers. Ces macromodèles ouvrent donc la porte à la démarche déductive. Par exemple, il suffit de modifier de façon continue un paramètre jugé important pour en déduire le comportement d'un risque. Ainsi, les modèles d'EDO ne sont contraints que par la créativité du géographe.

Deuxième avantage, ces modèles sont généraux. Quand le géographe part de données, les ajustements qu'il calcule fournissent des modèles valables pour ces seules données. Il faut se servir des données de la ville de Paris pour modéliser sa croissance démographique, en sachant que ce modèle n'est pas directement applicable pour la ville de Moscou. En revanche, avec les EDO, on intègre les connaissances que l'on a sur le(s) processus(s). Ainsi, un modèle de croissance logistique de population construit avec une équation différentielle est valable aussi bien pour la ville de Paris que pour l'État russe. La logique est identique, et seules changent les conditions initiales, les valeurs limites, et la valeur des paramètres. On comprend mieux pourquoi cette modélisation est privilégiée dans les recherches théoriques, ceci restant vrai pour des modèles plus compliqués. Cependant, les modèles stochastiques offrent de meilleures prévisions quand la qualité des données est très satisfaisante, ce qui est rarement le cas dans le domaine des risques (Pigeon et Rebotier, 2016) et encore moins dans celui des réactions humaines durant les catastrophes. En effet, les modèles d'EDO ont généralement un degré d'incertitude supérieur, car ils sont soumis à des contraintes techniques (résolution par des approximations numériques), méthodologiques et plus encore théoriques (oubli ou méconnaissance d'un mécanisme considéré comme secondaire ou demeuré inconnu).

Un troisième avantage est dû aux apports de l'approche qualitative de résolution des systèmes d'EDO. Cette méthode, contrairement à la démarche analytique, ne donne pas une solution précise, mais elle met à la disposition du chercheur l'ensemble des solutions potentielles. Elle offre donc une vision globale de l'évolution d'un risque. Et, en fonction

de données disponibles, qui permettent de fixer précisément les conditions initiales et la valeur des paramètres, le géographe peut trouver une solution locale et spécifique.

Le quatrième avantage, lui, puise également sa source dans la généralisation des méthodes qualitatives, car il est rare qu'un phénomène de risque se réduise à une seule variable. Plus souvent, le géographe se penche sur un système en comportant plusieurs. Or, grâce aux méthodes numériques et aux approches qualitatives, les modèles d'équations différentielles peuvent comporter plusieurs équations dont la résolution est relativement aisée. Seuls la mémoire de l'ordinateur et le temps de calcul freinent l'analyse de ces systèmes.

Cependant, les modèles d'EDO furent longtemps considérés comme trop schématiques. Ils permettaient certes de comprendre l'évolution de systèmes compliqués, comme l'attraction entre deux astres, mais ils semblaient inadaptés pour traiter de problèmes complexes, tels les risques. Acceptables dans les sciences dites dures, ils étaient jugés trop réducteurs dans les sciences sociales. Ainsi, ils étaient assimilés au déterminisme, simplificateur et inadapté à la complexité inhérente aux sciences humaines. De plus, cette macromodélisation n'acceptait pas la prise en compte d'évènements perturbateurs, comme l'impact de la rupture d'un barrage sur les écoulements d'une rivière ou les conséquences d'une guerre sur l'évolution d'une population. Ce n'est plus le cas. Il est possible de résoudre des équations qui simulent les impacts de délais, et mieux encore de crises graves. Il est permis d'inclure des accidents dans une évolution continue, par exemple la guerre de 1914-1918 dans une analyse démographique, ou pour donner un autre exemple, celui de la peste noire, qui apparut en 1347 à Marseille et fit mourir en cinq ans au moins un tiers de la population en Europe.

Mais ces méthodes de modélisation ne prennent en compte ni l'espace ni le hasard. Pour tenir compte des contraintes territoriales, il conviendrait soit de coupler les modèles d'équations différentielles aux modèles de réseaux, soit de construire des modèles d'équations différentielles partielles. C'est ce que nous réaliserons en collaboration avec les équipes de recherche des Universités du Havre (LMAH et LITIS) et de Nice Sophia Antipolis (LJAD), car les comportements humains sont aussi des processus de diffusion dans l'espace (partie 4). De même, pour introduire l'effet du hasard, il est possible de simuler des modèles d'équations différentielles stochastiques (EDS ayant une dimension finie) ou de décrire des modèles par des équations aux dérivées partielles stochastiques (EDPS ayant une dimension infinie), c'est-à-dire une EDP avec un terme aléatoire (cf. partie 4, chapitre 9).

Les avantages et les inconvénients de la simulation à l'aide de micromodèles

D'autres formes de modélisation existent, notamment les modèles d'automates cellulaires (AC) ou les systèmes multi-agents (SMA) lorsque l'on veut modéliser les interactions entre agents. Ces modèles prennent mieux en compte l'hétérogénéité des configurations spatiales et plus encore celle des individus (ces derniers sont nommés des *agents* dans les modélisations). Chaque agent peut être décrit par des caractères originaux et obéir à des règles spécifiques de transition. Cet avantage est cependant plus évident pour les SMA que pour les AC. Ce type de modélisation est particulièrement flexible pour « coller » à la réalité et est donc utile dans des études prévisionnelles ; d'autre part, elle favorise une réflexion approfondie sur les interactions, qui sont essentielles, notamment en sciences

sociales. Ces deux avantages sont en accord avec l'essor du paradigme de l'individualisme méthodologique qui enseigne que tout développement spatio-temporel est à découvrir dans les interactions entre les individus. Certes, ces interactions sont déjà bien présentes dans les modèles d'équations différentielles, mais leur prise en compte est globale. Par ailleurs, cette modélisation a l'avantage de lier les niveaux micro et macro, le local et le global, l'individu et son appartenance à une catégorie sociale. Elle semble donc bien répondre aux besoins de géographes, en permanence confrontés aux emboîtements de niveaux et d'échelles.

Mais ces modèles présentent aussi des lacunes qui rendent difficile leur interprétation, donc la compréhension des phénomènes modélisés. La première limite correspondrait à un biais systématique provoqué par les interactions locales, qui semblent conduire inévitablement à des phénomènes de ségrégation. C'est sans doute pertinent dans un grand nombre de situations réelles, mais est-ce bien un comportement universel qui dépendrait de la localité des interactions ? (Dauphiné, 2011). La question mérite d'être posée. La deuxième limite, la sous-détermination des modèles, est parfaitement commentée dans l'ouvrage de H. Atlan (2011) : « pour un même nombre d'unités, de nombreuses structures de connexions avec des dynamiques très différentes, peuvent générer les mêmes états stables ». Il est donc difficile d'attribuer un état à une configuration précise d'interactions, car un état observable peut être le produit de dynamiques très différentes. Concrètement, cette constatation signifie que la cause de tel ou tel état de crise ne peut être déterminée. Cette contrainte est une limite à toute modélisation à but explicatif. Elle disparaît quand l'objectif est de prévoir et non de comprendre.

Les modèles d'équations différentielles sont plus efficaces pour comprendre et expliquer les systèmes dynamiques (Varela, 1998). Assimilés par les scientifiques depuis plus de trois siècles, ils permettent de formaliser différents processus, d'étudier les états stationnaires, stables ou instables, et les bifurcations qui sont souvent à l'origine des catastrophes. J'ai démontré l'utilité de cette modélisation dans ma thèse (Provitolo, 2002).

Chapitre 4

Des modélisations dynamiques de catastrophes urbaines

Si l'aléa fait l'objet de nombreuses modélisations, plus rares étaient, à la fin des années 90, les modèles portant sur la vulnérabilité ou plaçant le risque au croisement de l'aléa et de la vulnérabilité. Quelques rares essais de modélisation graphique des catastrophes existaient, notamment le modèle PAR (Pressure and Release) et le modèle Access (Blaikie *et al.*, 1994) que nous avons présentés dans Dauphiné et Provitolo (2013). Ce type de modèles ne prend directement en compte ni le temps ni l'espace. Très utiles pour comprendre le fonctionnement d'une catastrophe, ces modèles ne permettent pas d'apprécier leur évolution spatio-temporelle.

Pour dépasser ces limites, l'un des objectifs de ma thèse était de considérer les catastrophes comme des systèmes dynamiques. J'ai retenu la théorie générale des systèmes de Ludwig von Bertalanffy et la modélisation systémique comme cadres formels pour construire des modèles de catastrophes axés sur la complexité des relations homme/nature et sur les dynamiques non linéaires. Pour construire ces modèles de simulation, j'ai utilisé la dynamique de système, méthode de modélisation proposée par J.W. Forrester dans les années 60, professeur à la « Sloan School of Management » du MIT. Cette méthode s'intéresse à la dynamique du système (son évolution dans le temps) et à la façon dont s'y produisent les ruptures et les changements. La rupture est une fracture, il y a un avant et un après (par exemple la disparition d'une espèce), tandis que le changement modifie (par exemple l'adaptation des récifs coralliens au changement climatique) (Salini, 2016 ; Donnadiou et Karsky, 2002).

J'ai construit ces modèles pour un risque majeur en Méditerranée, les inondations. Ces dernières, brutales et très localisées sur un bassin versant ou sur une ville, prennent souvent la population par surprise et participent ainsi de leur vulnérabilité. De plus, d'autres paramètres, tels l'urbanisation croissante, des politiques de prévention des risques et de gestion des catastrophes, parfois absentes, ou défaillantes (Gabert, 1996 ; Pigeon, 1995, 2012 ; Regezza, 2012) ou des comportements peu adaptés à la situation causent les catastrophes (Cepri, 2013 ; Vinet, 2003 ; Vinet *et al.*, 2011). La dynamique du risque n'est donc pas uniquement contenue dans l'aléa.

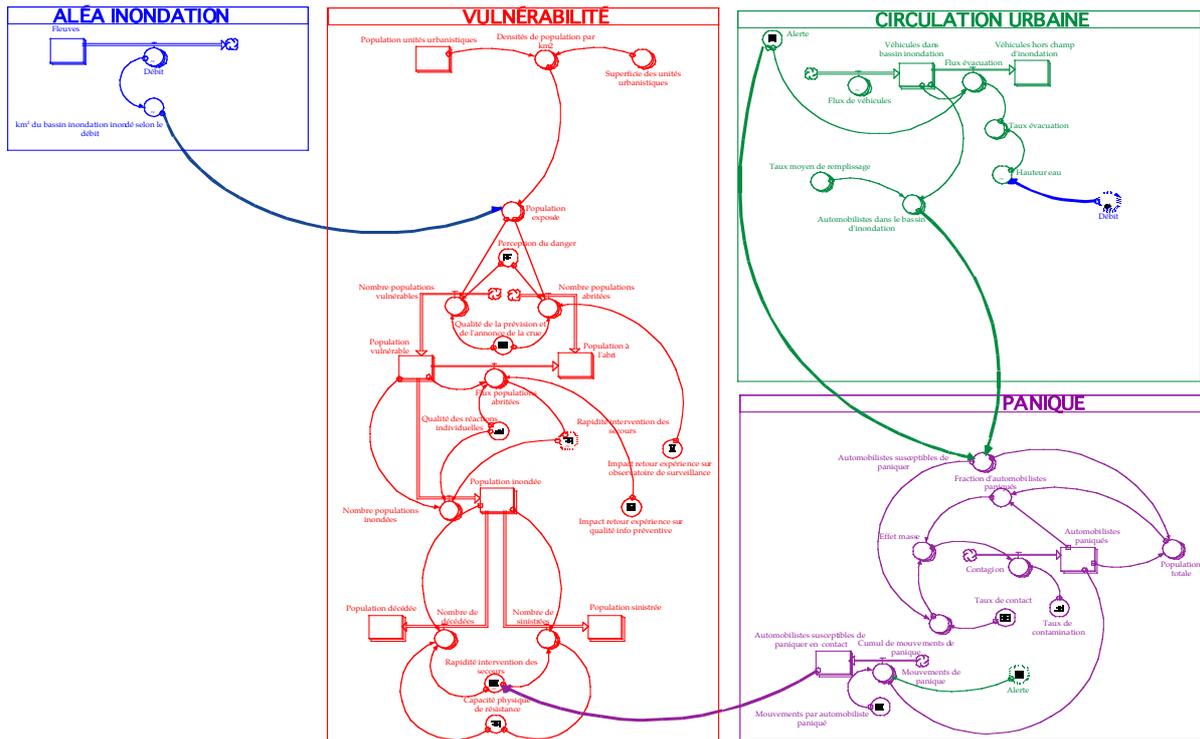
J'ai donc proposé des modèles originaux qui associaient les différentes composantes de la catastrophe, à savoir l'aléa inondation, la vulnérabilité humaine des piétons et des automobilistes pendant l'inondation, l'évacuation de ces derniers, ainsi qu'un effet de dominos rarement pris en compte, celui de la panique des populations lors d'inondation (Fig. 10). Il convient de préciser que, concernant le module « circulation urbaine », il ne s'agissait pas d'étudier la vulnérabilité des réseaux de communication mais de connaître la variabilité temporelle des flux de véhicules sur les différents axes de communication inondés et d'estimer ainsi les effectifs d'automobilistes présents dans la zone d'inondation, ou susceptibles de l'être.

Sur le plan technique, un modèle de simulation requiert l'utilisation d'un logiciel de simulation pour résoudre numériquement les équations (Chamussy *et al.*, 1984) et rendre expérimentale des objets, ici les risques d'inondation, peu accessibles à l'expérimentation *in vivo*. Pour recourir à l'expérimentation *in silico* (résolution numérique sans intervention

de l'homme au cours de la simulation), j'ai utilisé un logiciel de dynamique de système, Stella Research®.

Avec ce logiciel, chaque module est constitué, sous forme graphique, de variables d'état, de flux et de variables auxiliaires. Les équations produites sont des équations différentielles discrétisées en équation aux différences.

Figure 10 - La représentation graphique du modèle de catastrophe urbaine (Source : D. Provitolo, 2002) (cf. volume 3, publications, pour une meilleure lisibilité de la figure)

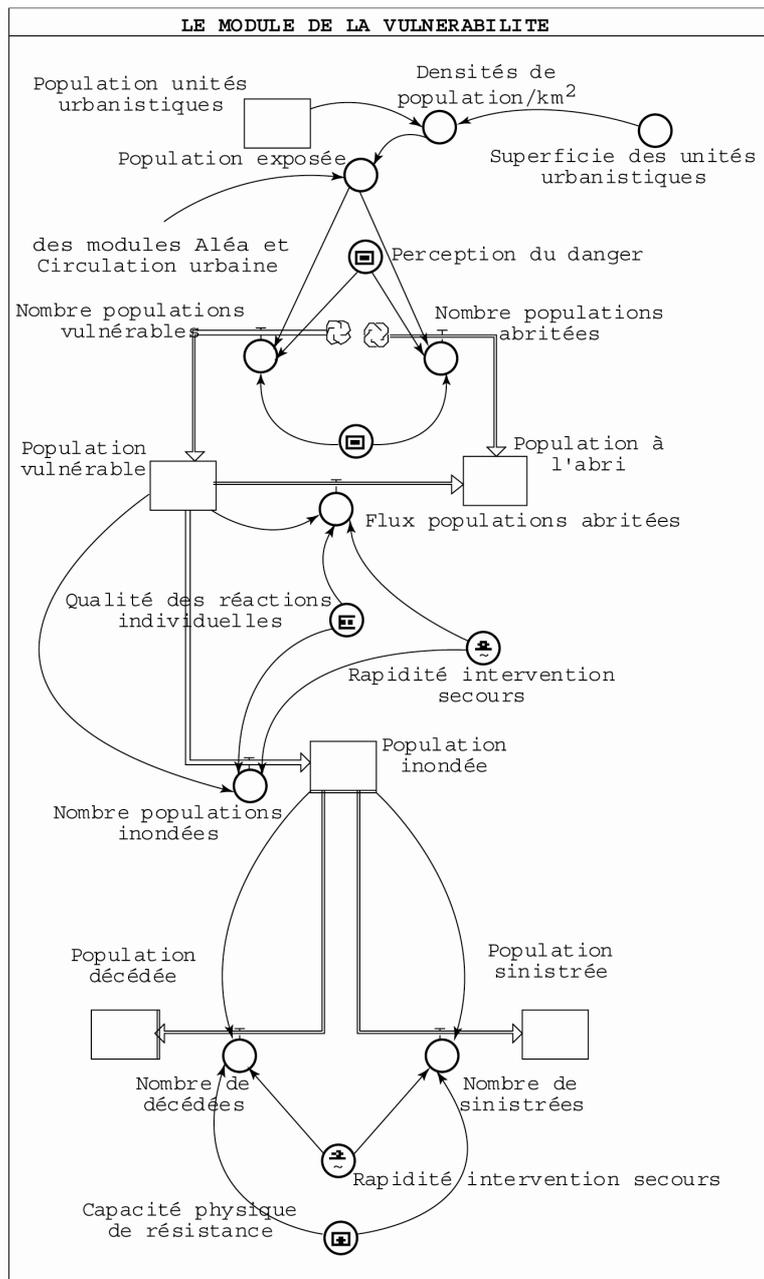


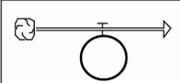
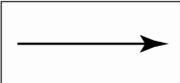
Le système de la catastrophe est alors identifié dans sa complexité, par les interactions entre ses composants, qu'il s'agisse de phénomènes physiques ou humains. Il dépasse la coupure nature-société. En effet, le modèle construit prend en compte des composantes hétérogènes : des volumes d'eau, des débits, des masses de population, des qualités de prévention et de gestion, des flux de véhicules, des automobilistes paniqués. Les liens entre ces phénomènes hétérogènes sont réalisés grâce à l'utilisation de variables auxiliaires¹² qui permettent d'établir une passerelle mathématique entre des modules composés d'unités de mesure différentes : par exemple, coupler un flux d'automobiles et un flux d'hommes grâce aux données fournies par les enquêtes ménages (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire) sur le nombre moyen de personnes présentes dans une automobile. À partir de la connaissance des flux de véhicules, il est ainsi possible d'évaluer les masses d'automobilistes exposés à l'inondation.

¹² Les variables auxiliaires peuvent être une constante, ou une fonction tabulée en fonction du temps t ou d'une variable quelconque. Ces variables auxiliaires sont très utiles pour intégrer de l'information qualitative et des délais dans les modèles.

Si l'on regarde plus spécifiquement le module de vulnérabilité humaine (Fig. 11), il est construit de façon à décomposer les différents états de la population lors d'une inondation. J'ai ainsi considéré cinq catégories : la population exposée, la population vulnérable, la population à l'abri, la population inondée et celle sinistrée ou décédée. En désagrégeant la population en cinq catégories, ce module permet de simuler la dynamique de la vulnérabilité humaine dans le temps. Par le biais des facteurs de vulnérabilité (par exemple, l'alerte « inondation », la perception du danger, la rapidité d'intervention des secours), ce modèle intègre les deux stratégies de lutte contre une catastrophe, celle agissant dans les premiers temps de l'évènement et faisant intervenir les politiques de prévention, les systèmes de surveillance et d'alerte ; celle intervenant dans un second temps et relative notamment à l'opérationnalité des services ayant en charge la gestion de l'évènement. Le but de ce modèle n'est donc pas seulement de décrire le système de vulnérabilité par le biais de variables d'état mais aussi d'introduire l'influence d'une série de paramètres sur le comportement du système. Lors de la phase de simulation, ces modèles déterminent les conditions permettant de diminuer le nombre de victimes lors des inondations.

Figure 11 – Le module de vulnérabilité humaine (Source : D. Provitolo, 2002, 2007)



- L**
E
G
E
N
D
E
-  Les stocks ou réservoirs sont les variables de niveau ou d'état. Ils fonctionnent comme des accumulateurs.
 -  Les flux alimentent ou vident le réservoir et en modifient donc l'état. Ils déterminent les variations dans les différents niveaux du système.
 -  Les variables auxiliaires peuvent être une constante ou une fonction tabulée. Elles permettent de coupler des variables de nature différente.
 -  Le canal d'information permet de connecter entre elles les variables du système. Il indique la source d'information dont dépend le flux.

Conclusion

Ces modèles ont permis de démontrer qu'il existe deux façons essentielles de lutter contre un événement catastrophique. La première vise à freiner l'accroissement de populations vulnérables en amont de la catastrophe, à faire porter les actions sur les entrées du modèle, et donc avant que la population ne soit impactée. La seconde consiste à intervenir sur la population affectée par l'inondation. Pour ces deux stratégies, différentes solutions sont envisageables. Ainsi, avant la catastrophe, les mesures de prévention et de réduction des risques telles la prévision et l'annonce de la crue, la perception du danger permettent de limiter le stock de populations vulnérables. Au contraire, pendant la catastrophe, les facteurs fonctionnels concernant la gestion de la crise ou ceux liés aux réactions individuelles et à la capacité physique de résistance ont pour effet de modifier les masses de populations inondées, sinistrées ou décédées.

Mais ces modèles présentent aussi des limites. Tout d'abord, dans le temps de la thèse, nous n'avons pas pu conduire des observations poussées sur les comportements humains : qu'il s'agisse de panique collective lors de rassemblements de population ou de comportements plus réfléchis (par exemple, fuite organisée, entraide). De plus, avec les outils utilisés, il était difficile d'intégrer complètement l'espace. Ce dernier a été abordé à partir de données relatives aux densités et aux surfaces. Pour dépasser ces limites et appréhender l'espace dans toute son hétérogénéité, il conviendrait par exemple de coupler la modélisation en dynamique de systèmes avec des réseaux de graphes. Ceci fera l'objet de nos perspectives de recherche (partie 4).

En contexte de catastrophes soudaines et imprévues, l'un des enjeux majeurs pour protéger la population est d'améliorer la compréhension et la capacité à anticiper les comportements humains, individuels et collectifs. Les deux questions majeures auxquelles j'ai souhaité apporter des éléments de réponse se formulent ainsi : comment se propagent les comportements de panique lors de rassemblement de personnes ? A quels comportements humains faudra-t-il faire face lors de catastrophes soudaines, imprévues et donc sans préalerte ?

Chapitre 5

Des modélisations dynamiques des comportements de panique

Pour faire face à la pluralité des risques qui pèse sur les populations et les territoires, la loi française de modernisation de la sécurité civile du 13 août 2004 place le citoyen au cœur de la question de la sécurité, au même titre que l'ensemble des acteurs en charge d'assurer les missions de prévention, de protection et de secours. Ce principe pose un double enjeu : faire que le citoyen concoure à sa sauvegarde en adaptant son comportement aux crises, développer une culture de la préparation au risque et à la menace au niveau des populations.

La connaissance des comportements effectifs des personnes en période d'alerte ou d'épisode catastrophique constitue donc un élément fondamental de la gestion des catastrophes. Aujourd'hui, l'accent est mis sur la prévention, en informant les populations sur les risques encourus et les comportements à adopter en période d'alerte (Davoine, 2014). Pourtant, le constat a été fait que les populations ignorent souvent de quelle façon elles doivent agir ou réagir pour se protéger de la menace ou de la catastrophe qu'elles sont susceptibles de subir (Cepri, 2013). Les récentes intempéries dans les Alpes-Maritimes en octobre 2015 et l'analyse de situations réelles (par exemple l'explosion à Bhopal, l'attentat au World Trade Center, le tsunami en Indonésie, la tempête Xynthia, le cyclone Katrina etc.) ont mis en évidence des comportements qui n'avaient pas été anticipés. Si certains de ces derniers s'avèrent adéquats, d'autres malheureusement plus nombreux (Boyd 1981, ISI 2012) pourraient se révéler inappropriés (panique sidérante, fuite panique), voire clairement décalés (curiosité, protection des biens etc.) par rapport aux réactions attendues et préconisées par les acteurs opérationnels (Quarantelli, 2008). Ces derniers s'attendent généralement à ce que la population suive les consignes de sécurité préconisées dans les documents de prévention, or ce n'est pas toujours le cas, notamment car ces documents restent encore aujourd'hui insuffisamment connus et mobilisés par la population.

Pourtant, les impacts d'un phénomène dangereux sont notamment déterminés par le(s) comportement(s) des populations. Les réactions adaptées à la situation conditionnent :

- ✓ le fait pour un citoyen d'assurer sa sécurité, celle de ses proches et de ses biens (réduire l'exposition à la menace),
- ✓ le bon déroulement des opérations de secours en évitant notamment la sur-exposition des secouristes à des situations supplémentaires de danger (Cepri, 2013).

Mais connaître les comportements réellement adoptés lors de catastrophe, expliquer l'émergence de comportements collectifs, identifier les trajectoires de déplacement pouvant être retenues par les populations reste un challenge auquel nous souhaitons répondre, la connaissance en ce domaine étant très partielle.

Pour ce faire nous avons mobilisé i) l'univers de l'observation pour cerner la diversité des réactions humaines pouvant se produire, ii) l'univers de la modélisation mathématique pour d'une part simuler l'émergence d'un comportement rare mais craint, celui de la panique collective, d'autre part simuler les enchaînements de réactions comportementales,

les neurosciences enseignant que l'être humain ne reste pas figé dans un même état comportemental du début à la fin d'un évènement catastrophique, iii) l'univers des concepts pour définir le comportement et la panique.

5.1. Un rapide tour d'horizon sur la notion de comportement et sa mobilisation en géographie des risques

L'étude du comportement humain est un domaine de recherche ancien qui, longtemps, est resté du ressort de la philosophie et de la médecine. Depuis le XIX^{ème} siècle et surtout le XX^{ème} siècle, différentes disciplines se sont constituées autour de cet objet de recherche : l'éthologie, la psychologie, les neurosciences, la neuropsychologie, la neurologie, la psychiatrie... Certains secteurs de la sociologie, de l'anthropologie, de la génétique, de l'économie, de la géographie et des sciences de l'éducation s'intéressent également au comportement humain.

En fonction des approches disciplinaires et des écoles de pensée (éthologie, béhaviorisme, psychologie cognitive, psychanalyse, etc.), il existe aujourd'hui plusieurs définitions et approches du concept de comportement. De nombreux ouvrages sur l'ensemble de ces approches existent et révèlent la complexité du concept de comportement et les divergences des écoles de pensée. L'un de leurs points communs est de rechercher les mécanismes qui amènent les individus ou les populations à adopter tel ou tel type de comportements. Ainsi, l'approche psychanalytique insiste sur l'histoire individuelle de chaque personne pour comprendre la dynamique intrapsychique conditionnant son comportement. L'approche éthologique place le comportement sous la dépendance de l'instinct tandis que l'approche béhavioriste (la psychologie comportementale) privilégie le modèle du réflexe conditionné pavlovien qui permet de comprendre comment le psychisme se construit à partir d'associations stimulus-réponse (Skinner, 1957). En opposition, l'approche cognitiviste étend l'étude du comportement à des activités internalisées (pensée, affect) et s'intéresse aux processus psychologiques et aux représentations mentales (Sander, 2011). Cognitivement, l'être humain n'est pas un être réflexe (Steiner, 2005). L'approche neuropsychologique permet d'une certaine façon de relier ces différents éléments en étudiant les relations entre les régions du cerveau et les comportements instinctifs, contrôlés et émotionnels associés aux catastrophes (Fig. 19). Nous retenons cette approche pour organiser la connaissance sur le panel de réactions humaines et modéliser ces dernières (chapitre 6).

En géographie des risques, les recherches sur les comportements portent rarement sur la psychologie individuelle des personnes générant tel ou tel type de comportement. Les études s'intéressent davantage aux comportements qu'il est possible d'observer sur une scène de catastrophe et aux dynamiques d'évacuation. Le comportement est alors considéré comme un phénomène objectivement observable, en interaction avec l'environnement, et est associé à la notion de mouvement de l'organisme (extrait de psychobiologie.ouvaton.org). Mes recherches s'appuient sur cette définition.

Les recherches sur les comportements humains en situation de catastrophe ou de désastre¹³, donc de rupture avec le temps du quotidien révèlent une coupure entre deux univers de recherche, celui de l'observation, celui de la modélisation.

Concernant l'observation des réactions lors d'un évènement spécifique, les thématiciens mènent des recherches sur l'identification et la description des réactions lors d'une catastrophe spécifique. Les méthodes d'observation et d'enquêtes sont alors majoritairement mobilisées. On peut citer, sans volonté d'exhaustivité, des recherches sur les comportements humains menées i) sur de vastes territoires : les bombardements aériens au cours de la seconde guerre mondiale (Janis, 1951), la comparaison des perceptions des évènements naturels dans le monde réalisées dans le cadre du programme Man And Biosphère¹⁴ (Baumann et Sims, 1974 ; Whyte, 1978), ii) sur des territoires plus restreints en prise le plus souvent avec des aléas naturels : on pense au tremblement de terre de Loma Prieta en 1989 (Bourque et Russel, 1994 ; Mileti, 1991), aux coulées de boue au Venezuela en 1999 (Revet, 2009), au cyclone Katrina en 2005 (Barsky *et al.*, 2006) ou encore à l'éruption volcanique du Karthala en 2006 (Morin *et al.*, 2009). Il s'agit d'appréhender le panel de réactions comportementales pouvant se produire, de mettre en perspective les comportements les uns par rapport aux autres et de tenter ainsi de les quantifier.

D'autres travaux se sont focalisés sur les réactions de panique (Crocq, 2013 ; Drury et Reicher, 2011 ; Quarantelli, 2008 ; Dupuy, 1991b ; Jeudy, 1981). Il s'agit d'identifier, voire de démontrer, la récurrence du comportement de panique lors d'évènements différents, d'en révéler les causes et mécanismes généraux, et d'en décrire les différentes formes.

Enfin, plus récemment, les comportements sont étudiés sous le prisme de la résilience avec des analyses sur les stratégies d'adaptation des automobilistes face aux crues rapides dans le Gard (Ruin, Lutoff *et al.* 2014), les résiliences des communautés face au tsunami en Europe (programme européen Astarte – Granche, Lavigne *et al.*, 2014) ou les capacités de gestion des crises et résilience sociétale en Europe (programme européen Driver).

Ces analyses reposent essentiellement sur une recherche empirique basée sur des recueils d'information issus soit d'écrits d'historiens, soit de témoignages (textes d'écrivain pour des évènements anciens, réalisations d'enquêtes avant et/ou après un désastre contemporain), soit de l'observation effectuée par des sauveteurs ou des journalistes sur le terrain ou par l'analyse de photos ou vidéos permettant d'identifier les réactions humaines lors de désastres.

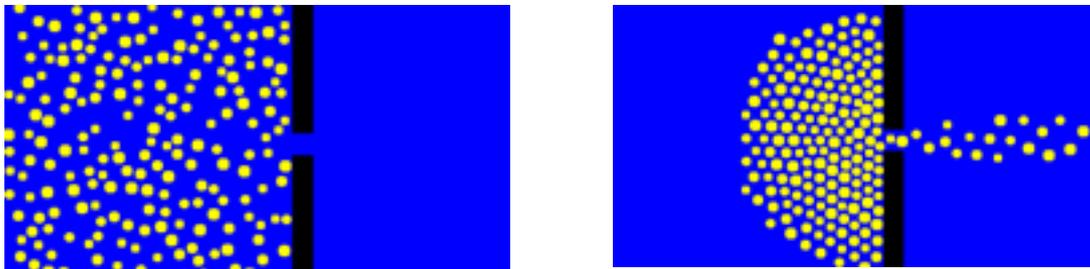
Les modélisateurs, quant à eux, s'intéressent essentiellement aux dynamiques de foule, le plus souvent paniquée. Dans cette problématique, deux phénomènes se couplent : la propagation de la panique et le déplacement collectif. La propagation de la première, décrite par des états comportementaux et des phénomènes d'imitation et de contagion, s'inspire des dynamiques de la propagation épidémique traitée par des systèmes différentiels (Provitolo, 2005 ; Colombo *et al.*, 2010). Des modèles mathématiques s'intéressent plus

¹³ Une catastrophe ou un désastre est un risque qui se réalise. Nous utilisons ces deux termes comme des synonymes, même si des critères, identifiés notamment par E.L. Quarantelli (2005), permettent de les distinguer.

¹⁴ Le MAB est un programme intergouvernemental sur l'homme et la biosphère (**MA**n and **Bi**opshere) mis en place par l'UNESCO en 1969.

spécifiquement, non pas à la propagation de la panique, mais à l'évacuation de la foule en prenant en compte l'effectif des individus, la densité d'occupation, la vitesse de déplacement (Combres, 1994 ; McCarl Nielsen, 1976). D'autres modèles assimilent l'évacuation des personnes à l'écoulement d'un fluide ou à des particules de gaz. Le déplacement collectif connaît d'ailleurs, ces dernières années, un essor assez important grâce à des modèles particuliers soumis à des systèmes de forces dites sociales (Hagenauer *et al.*, 2011 ; Helbing *et al.*, 1995, 2000). Ces modèles de foule décrivent un piéton comme une particule soumise à des forces attractives (la destination, rejoindre certains piétons) et des forces répulsives (murs, certains piétons). Ils sont très largement utilisés en raison de leur simplicité et extensibilité. Cependant, ils présentent plusieurs limites : les interactions sont essentiellement de type réactif, les changements d'états comportementaux ne sont pas intégrés et la configuration territoriale est simplifiée.

Figure 12 - Le modèle de forces sociales d'Helbing (extrait de Helbing *et al.*, 2002)



Des états individuels de type nervosité ont été introduits dans ces modèles (Moussaid et Theraulaz, 2011), sans intégrer pour autant la dynamique propre de la propagation de cette nervosité. Des modèles d'automates cellulaires (AC) ou des systèmes multi-agents (SMA) basés sur des simulations discrètes à base de règles, ont aussi été mobilisés (Daudé *et al.* 2009 ; Phan et Amblard, 2007). Ces derniers modèles fournissent des descriptions à des échelles microscopiques, nécessitant de représenter physiquement des déplacements individuels avec des aspects stochastiques qui les rendent difficiles à valider par des situations réelles observées. Quant aux modélisations par automates cellulaires, elles permettent plus difficilement d'intégrer les influences directes de comportements provenant de zones géographiques éloignées. Ce type d'approche est également limité en termes de compréhension macroscopique des évolutions sensibles à certains paramètres et de renversement de tendances exprimé par des bifurcations (Martin *et al.*, 2015).

C'est pourquoi, j'ai opté pour la modélisation en dynamique de système pour étudier tout d'abord la propagation de la panique dans une foule (cf. section 5.2), puis d'un panel de comportements humains et de leurs changements (cf. chapitre 6).

5.2. Un préalable à la modélisation du panel des comportements humains : comprendre les comportements de panique

J'ai d'abord porté une attention particulière aux comportements de panique collective, cette réaction s'avérant dangereuse pour la population qu'elle frappe (piétinement, écrasement, fureur) et ce particulièrement dans le cas de foule déjà formée.

5.2.1. Les enjeux de la panique collective

Jean-Pierre Dupuy (1991b) rappelle qu'initialement le mot panique vient de la mythologie grecque. « Au pays du bonheur calme et serein, l'Arcadie, Pan guidait paisiblement ses troupeaux. Ce dieu des bergers, mi-homme, mi-bouc, à la fois monstre et séducteur, virtuose de la flûte et insatiable amateur de nymphes, possédait des traits plus inquiétants : il pouvait soudain surgir de derrière un bosquet et inspirer une terreur subite : la panique » (Dupuy, 1991b). Cette dernière déclencherait alors une sorte de « sauvagerie contenue au sein de la cité » (Olender, 1982). Dans le prolongement de la mythologie grecque, L. Crocq (1994) définit la panique comme « une peur intense déclenchée par la survenue d'un danger réel ou imaginaire ressentie simultanément par tous les individus d'un groupe, d'une foule ou d'une population, caractérisée par la régression des mentalités à un niveau archaïque et grégaire, et débouchant sur des réactions primitives de fuite éperdue, d'agitation inconsidérée, de violence ou de suicide collectif ». Elle est une réponse des individus face à la survenue, le plus souvent brutale, d'un danger ou de sa menace.

Comme nous ne croyons plus aux dieux, une attention particulière mérite d'être portée aux réactions de panique lors de catastrophes (Parrochia, 2008). Comme l'écrit L. Crocq (2013) dans son ouvrage intitulé *Les Paniques collectives*, « aujourd'hui nous vivons l'ère des foules, de la multitude et des grands rassemblements de personnes {...}. Et si un danger ou une menace se manifeste dans ces conjonctures, la peur panique, propagée de proche en proche comme une avalanche, ou saisissant d'emblée toute la masse, va se manifester sous la forme d'une panique collective ».

La panique lors de rassemblements d'individus a un « statut » un peu particulier, car si cette réaction n'est pas la plus fréquente, elle est en revanche particulièrement redoutée (Crocq, 1994) et ce, pour plusieurs raisons :

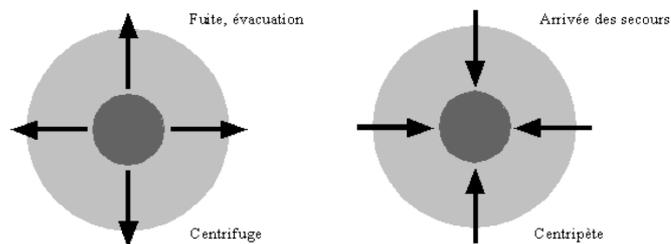
- Dans la plupart des cas, les comportements collectifs de panique majorent le nombre de victimes, qui sont le plus souvent piétinées dans la fuite ou écrasées contre un obstacle lors de rassemblements d'individus comme à la Mecque, dans des stades lors de matchs de football (Photo 3), et de grands rassemblements (fêtes, concerts etc.). Ces comportements créent en outre de la désorganisation sociale (Crocq *et al.* 1998) et la panique collective est ainsi une situation où les réactions humaines influencent l'évènement en l'aggravant (boucle de rétroaction).

Photo 3 - Un mouvement de panique collective au stade de football du Heysel, 1985 (Belgique) (Source : S. Cosimelli, affaritaliani.it)



- Sur le plan de l'intervention, lorsque la panique collective se déclenche, elle est difficilement contrôlable et enrayable (Photo 3). Comme le note C. Denis-Remis (2007) « Pour les pompiers, la difficulté lorsque l'on arrive sur un site où les gens sont paniqués, c'est qu'ils sont irrationnels au niveau de leurs paroles et de leurs actes. Si on tombe sur des types comme cela, il va falloir des moyens énormes uniquement pour calmer la panique ». Il vaut donc mieux prévenir ces mouvements collectifs, et donc les anticiper, plutôt que de les subir. Il est ainsi souhaitable d'établir des mesures préventives à long terme (information de la population, éducation, exercice d'évacuation) et à court terme (gestion de la phase d'alerte) afin d'éviter l'éclosion de tels comportements.
- Enfin, les mouvements de panique ont des répercussions sur l'acheminement des secours et sur l'évacuation de la zone inondable. Ce fut notamment le cas en 1991, en Californie, à Oakland, où, face à la rapide propagation d'un incendie, nombre de résidents abandonnèrent leurs véhicules sur la chaussée pour prendre la fuite, bloquant ainsi le réseau routier et la progression des secours. Plus généralement, les décideurs devraient viser à ce que les mouvements centrifuges visant à s'éloigner de la zone d'impact (panique avec fuite, évacuation spontanée ou planifiée...) n'entravent pas le déroulement des mouvements centripètes (arrivée des secours sur les lieux de la catastrophe) (Fig. 13).

Figure 13 – Les dynamiques centrifuge et centripète (Source : D. Provitolo, 2005)



5.2.2. Des paniques collectives observées quelle que soit l'origine de la catastrophe

La panique est l'un des comportements collectifs observables en situation de catastrophe. Elle est relatée dans différents documents (archives, récits, coupures de presse, photographies) et observations de terrain réalisées par les sauveteurs, le corps médical, les sociologues (qui relèvent de l'école française, ceux de l'école américaine réfutant l'idée de panique) et les psychologues. Ainsi, des comportements de panique sont rapportés, quelle que soit l'origine de la catastrophe et à différentes échelles.

Les effets de panique s'observent dans les catastrophes d'origine technologique. Ce fut par exemple le cas lors de la catastrophe de la ville de Bhopal, en Inde, le 3 décembre 1984, où, sous l'effet de la panique, 10000 personnes sont sorties de chez elles et ont pris la fuite au lieu de rester confinées. Comme le précise A. Lalo (1999), le confinement n'est pas un comportement inné lors d'un accident technologique. Ces mouvements de fuite eurent pour effet d'accroître la vulnérabilité de la population aux émanations de gaz mortel. Bhopal fit 2500 victimes et plus de 500000 blessés (Laneyrie-Dagen, 1994).

Le 21 septembre 2001, dix jours après les attentats de New York, se produisait à Toulouse l'explosion de l'usine Azote de France. Le souffle de l'explosion a produit des dégâts sur 5 km, provoqué 30 décès et 2500 blessés. La fuite inorganisée des personnes, les embouteillages bloquant toutes les voies d'accès, y compris pour les véhicules de secours, les messages contradictoires des radios, la saturation des lignes téléphoniques, tout cela a renforcé la panique générale (Observatoire français de la sécurité des établissements scolaires et d'enseignement supérieur, 2002).

La panique est aussi présente lors de catastrophes naturelles, notamment lors d'inondations, de tremblements de terre ou d'éruptions volcaniques. Cette réaction de panique chez les automobilistes prisonniers des eaux dans leur véhicule cause, depuis une vingtaine d'années, le plus grand nombre de victimes recensées lors des inondations aux États-Unis. Ces dernières meurent noyées dans leur voiture en tentant de fuir la montée des eaux. Ces mêmes réactions furent observées lors de l'inondation d'Alger en novembre 2001. Des comportements de panique avec fuite éperdue ont également été rapportés lors du tsunami qui affecta les côtes du golfe du Bengale (décembre 2004) ou lors du séisme de Tokyo (septembre 1923). En tentant de rejoindre l'autre rive du fleuve Sumida qui longe le centre de Tokyo pour échapper à l'avancée des flammes, des centaines de personnes, prises de panique, basculèrent dans l'eau où beaucoup trouvèrent la mort (Hadfield, 1992).

Plus récemment, L. Crocq (2013) a décrit plus d'une trentaine de catastrophes, qu'elles soient d'origine naturelle, technologique ou la conséquence d'attentats ou de combats militaires. Il ressort de ces observations que *« la panique collective de fuite existe bel et bien »*. Elle *« peut saisir des groupes d'effectif restreint aussi bien que des foules entières. Elle peut se produire aussi bien dans un local que dans une salle de spectacle, dans une ville sinistrée par un incendie gigantesque, ou dans un pays fuyant une invasion ennemie »* (Crocq, 2013).

Associés notamment à la concentration humaine et aux effets de contiguïté dans un rassemblement de personnes, les phénomènes de panique se développent donc à différentes échelles : depuis la panique limitée à un local (fuite panique survenue lors de l'incendie du Bazar de la Charité à Paris, le 4 mai 1897, 124 morts) jusqu'aux paniques à l'échelle d'un quartier, d'une ville, voire d'un pays lors d'épidémies.

Ces quelques exemples montrent que le phénomène de panique fait partie de la problématique de la gestion des catastrophes et de la protection des populations.

5.2.3. Les mécanismes de la panique

L. Crocq (2013) a identifié trois schémas principaux pour expliquer les mécanismes de la panique. D'une part, le schéma neurophysiologique où un individu exposé à une menace y réagit immédiatement et individuellement. La panique collective serait alors une juxtaposition de réactions réflexes de stress dépassé où l'on verrait par exemple tous les sujets fuir précipitamment un lieu sans imiter les voisins. D'autre part, le schéma de l'imitation qui consiste à imiter une personne en qui on place sa confiance (par exemple imiter un leader, une personne qui connaît les lieux pour évacuer), ou imiter son voisin, de proche en proche, parce que l'on ne sait que faire face à la situation. Cette imitation a une connotation essentiellement rationnelle. Enfin, le schéma de la contagion permet de

rendre compte « de la dimension affective » qui sous-tend le mimétisme de la panique. Ce processus, bien connu de la psychologie des foules (Le Bon, 1895), a fait l'objet d'une traduction psychologique sous le terme de contagion émotionnelle (Hatfield *et al.*, 1994) : une tendance automatique, non intentionnelle et souvent inconsciente, à imiter et à synchroniser des expressions faciales, des mouvements du corps et des vocalisations pendant les rencontres avec d'autres individus.

Ainsi, dans une foule, la panique collective émerge via différents processus (neurophysiologique, imitation et contagion) qui peuvent jouer de concert ou avec des délais. Face à un danger dans une foule, il se peut que quelques personnes réagissent immédiatement à la situation (schéma neurophysiologique) avec des expressions faciales de peur pouvant générer autour d'elles un processus d'imitation ou de contagion.

5.2.4. La modélisation de la propagation de la panique collective

« Un système complexe peut être représenté comme l'analogie d'un autre système pour lequel des raisonnements sont classiques, voire des lois sont connues » (J.Y. Rossignol, 2018)

Le modèle de panique proposé (Provitolo, 2005, 2009 ; Provitolo et Daudé, 2008 ; Provitolo *et al.*, 2012) intègre directement les schémas d'imitation et de contagion, même si je ne cherche pas à distinguer le processus de l'imitation (qui serait rationnelle) de celui de la contagion (qui serait irrationnelle). Il prend en compte indirectement le schéma neurophysiologique par la présence de population qui ont immédiatement réagi à la menace en paniquant (la variable d'état Pp du modèle expliqué ci-après). Il a été construit par analogie avec le modèle mathématique de diffusion des épidémies élaboré par les biomathématiciens W.D. Kermack et A.G. McKendrick (1927). En effet, le concept de contagion emprunté à la biologie et à l'épidémiologie (qui s'occupent d'étudier la façon dont certains éléments se transmettent et se répandent dans une population) se révèle extrêmement efficace pour rendre compte de ce qui se passe en contexte de foule. La métaphore de la contagion revient à proposer que, comme les agents infectieux, les comportements peuvent s'échanger dans une population. il est possible d'établir une série de points de rapprochement entre les deux phénomènes d'épidémie et de panique : i) chacun est susceptible de contracter et propager (diffuser) la maladie (la panique), ii) il y a une nécessité de contact entre un malade (émetteur de la panique) et un individu sain (récepteur), iii) chaque individu a des chances de contact identique.

Dans le modèle épidémiologique proposé par Kermack et Mc Kendrick en 1927, la population au sein de laquelle l'épidémie est en train de se propager est divisée en trois groupes : les susceptibles, les infectés, les guéris ou décédés. Les susceptibles $S(t)$ correspondent aux populations pouvant être atteintes par la maladie mais ne l'ayant pas encore contractée. Les infectés $I(t)$ ont en revanche contracté la maladie et sont donc vecteurs de la contagion. Enfin, le troisième groupe représente les populations guéries $R(t)$ ne pouvant plus contracter la maladie et les populations décédées à cause de cette maladie.

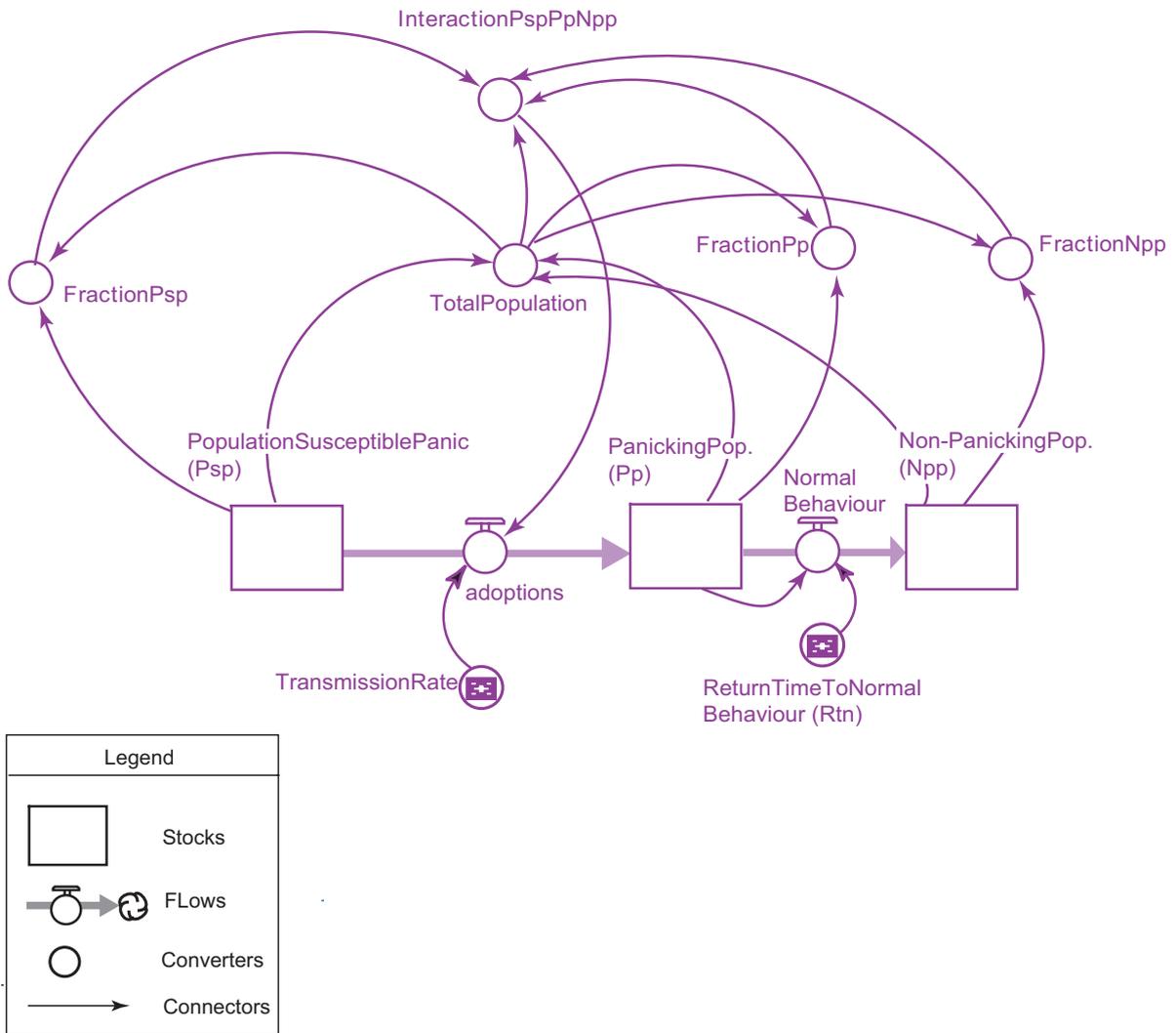
Ce modèle de panique (Fig. 14) s'appuie donc sur cette approche épidémiologique avec trois catégories de populations dans trois états comportementaux : les populations susceptibles de paniquer $Psp(t)$, les populations sous l'emprise de la panique $Pp(t)$, et les populations ne pouvant plus être vecteurs de cette panique $Npp(t)$. A chaque pas de temps, chaque groupe de population dans un état comportemental entre en contact avec les autres groupes, ce qui est formalisé par les interactions $PspPpNpp$. Toutefois,

l'interaction entre les groupes de population est une condition nécessaire mais non suffisante à la diffusion de la panique. La probabilité pour que la population susceptible de paniquer passe à l'acte est liée aux taux de transmission ($T\tau$). Ce taux permet de concrétiser la contagion de la panique entre chaque population en contact. Il s'agit d'un coefficient qui varie de 0 à 1, c'est-à-dire d'une faible à une forte contamination. De plus, les personnes paniquées finissent par ne plus l'être au bout d'un certain laps de temps, il y a donc un flux qui « vide » le stock de ces dernières. Ce flux de sortie est proportionnel au nombre de personnes paniquées et au temps moyen de retour à un comportement « pseudo-normal » ($R\tau$).

Ce modèle de panique inclut plusieurs hypothèses, dont certaines sont réductrices :

- la panique est un comportement imitatif (canal de propagation),
- la foule (effet de l'environnement) constitue le socle de l'émergence de panique collective,
- le comportement collectif n'est pas la somme arithmétique des comportements individuels (dynamiques non linéaires),
- la population totale est constante, c'est-à-dire que des phénomènes migratoires entre la zone ayant subi la catastrophe et les autres zones n'ont pas lieu, ce qui est acceptable si on analyse la diffusion de la panique sur une période courte,
- la population est homogène, sans distinction d'âge ou de structure sociale,
- l'espace est homogène et isotrope.

Figure 14 - Un modèle de panique basé sur les interactions entre populations
(Source : D. Provitolo, 2009)



Les équations de ce modèle (publié en anglais) sont :

$$- P_{sp}(t) = P_{sp}(t - dt) - (adoptions) \times dt \quad (1)$$

$$- P_p(t) = P_p(t - dt) + (adoptions - Normal\ behaviour) \times dt \quad (2)$$

$$- N_{pp}(t) = N_{pp}(t - dt) + (Normal\ Behaviour) \times dt \quad (3)$$

$$- Interaction\ P_{sp}P_pN_{pp} = (FractionP_{sp} \times Fraction\ P_p \times Fraction\ N_{pp}) \times Total\ Population \quad (4)$$

$$- Adoptions = Interaction\ P_{sp}\ P_p\ N_{pp} \times Transmission\ Rate \quad (5)$$

$$- Normal\ behaviour = \frac{P_p}{Rtn} \quad (6)$$

$$- Total\ Population = P_{sp} + P_p + N_{pp} \quad (7)$$

$$- FractionP_{sp} = \frac{P_{sp}}{TotalPopulation} \quad (8)$$

$$- FractionP_p = \frac{P_p}{TotalPopulation} \quad (9)$$

$$- FractionN_{pp} = \frac{N_{pp}}{TotalPopulation} \quad (10)$$

5.2.5. Les résultats de simulations : le mouvement collectif devient le meneur

A partir de différentes simulations, il a pu être démontré qu'il n'y a pas besoin de chef d'orchestre pour coordonner la panique collective. Son émergence est liée aux interdépendances entre les variables. La panique collective est dépendante des conditions initiales, c'est-à-dire la quantité de population paniquée au démarrage de la simulation, des valeurs de paramètres relatifs aux taux de transmission de la panique, au temps de retour à un comportement « normal ». Ainsi, les résultats de simulation révèlent que, pour une même structure de modèle, la panique collective n'émerge pas dans tous les cas. Elle n'est donc pas « une fatalité inéluctable ». Elle prend forme sans action concertée, sans leader, sans programmation au niveau individuel d'un comportement global. C'est un comportement auto-organisé (Provitolo *et al.*, 2012 ; Provitolo, 2008, 2009). Ces phénomènes d'auto-organisation (Bak, 1996) s'observent d'ailleurs aussi bien dans les sociétés animales (l'organisation de fourmilière, de vols d'oiseaux) que dans les sociétés humaines (les applaudissements lors d'un spectacle) ou les systèmes géographiques (les réseaux urbains) (Sanders, 2013 ; Dauphiné, 2003 ; Pumain *et al.*, 1989).

Je présente ici des résultats de simulations pour des conditions initiales de populations paniquées ou des valeurs de paramètres distinctes. Afin de représenter une foule, la population susceptible de paniquer est toujours égale à 500 individus.

Trois cas sont présentés. Les deux premiers permettent de tester le rôle du nombre de populations paniquées dans une foule, au moment où un choc survient, sur la dynamique de propagation de la panique collective. Les cas 1 et 2 présentent donc des résultats de simulations pour lesquels les conditions initiales de populations paniquées diffèrent. En revanche, le taux de transmission de la panique (Tr) et celui du temps de retour à un comportement « normal » (Rtn) sont fixés et non modifiés. Le cas 3 par contre illustre les rôles des taux de contamination et des temps de retour à la normale sur la dynamique de la panique. La représentation des variables sur un plan de phase est très instructive : la seule visualisation des courbes montre des résultats distincts. Des processus généraux identiques produisent donc des effets et des structures différentes en fonction des conditions initiales et des valeurs des paramètres qui contrôlent les interactions et leurs évolutions.

Cas 1 :

- $P_{sp} = 500$ personnes
- $P_p = 13, 50, 100, 200, 300, 500, 600$
- $P_{np} = 0$ (ce stock est toujours initialisé à 0 car au démarrage de la simulation, il n'y a encore aucune personne paniquée ayant retrouvé son état normal)
- $Tr = 1$
- $Rtn = 24$ unités de temps

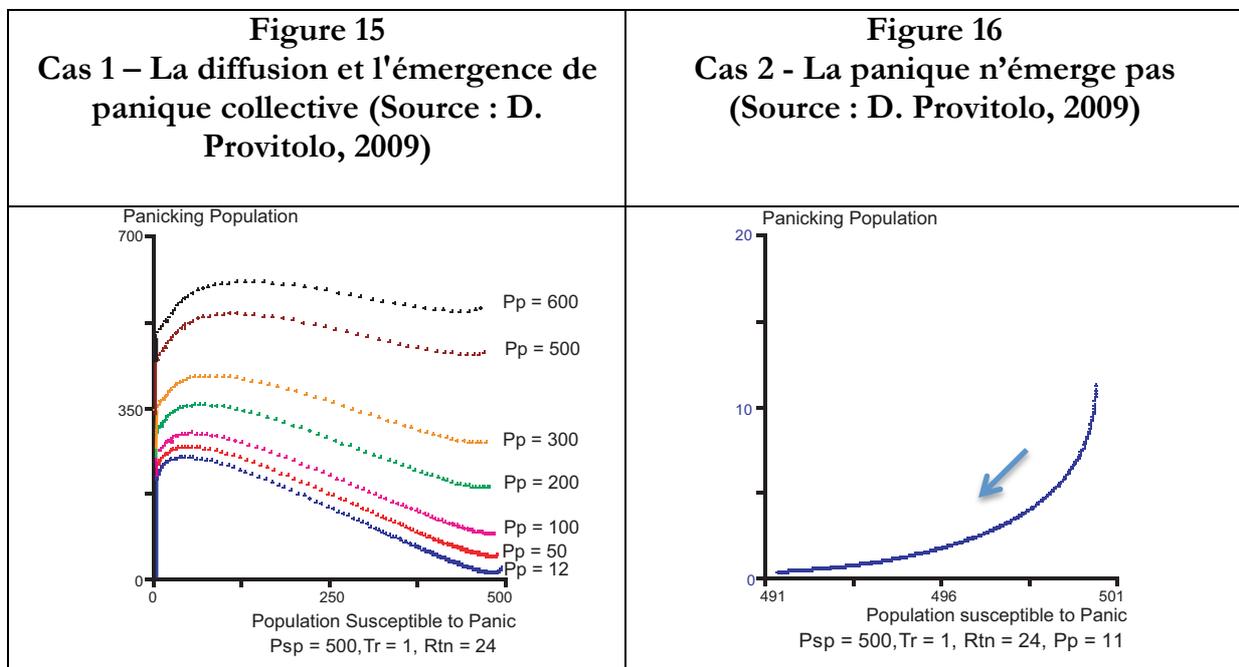
Pour l'ensemble des valeurs de populations paniquées supérieures ou égales à 12, et pour $P_{sp} > P_p$ ou $P_{sp} < P_p$, toutes les trajectoires d'évolution tendent vers l'équilibre (0,0). Les populations paniquées et les populations susceptible de paniquer tendent à disparaître. Pour ces valeurs, il n'y a pas de modification qualitative du modèle (Fig. 15). Les trajectoires ont grossièrement la même allure. Elles se dispersent sur différents points d'équilibre (dès que la courbe atteint l'axe Y *-Panicking Population-*, alors P_{sp} est nulle pour des valeurs de populations paniquées distinctes au démarrage de la simulation) avant de

converger toutes vers un même point d'équilibre (0,0). Ce point d'équilibre signifie que, au bout d'un certain temps, P_{sp} et P_p sont nulles. L'ensemble de ces trajectoires montre donc que pour un taux de transmission de la panique fort ($Tr = 1$) et un temps de retour à la normale relativement long ($Rtn = 24$ unités de temps) il y a émergence de la panique (pente ascendante) avant d'atteindre un point d'équilibre aux coordonnées (0,0). L'émergence de la panique est particulièrement visible pour des valeurs initiales de populations paniquées faibles (13, 50 et 100). Au-delà de ces valeurs, la pente de la courbe est beaucoup plus faible.

Cas 2 :

- $P_{sp} = 500$ personnes
- $P_p = 11$
- $P_{np} = 0$ (ce stock est toujours initialisé à 0 car au démarrage de la simulation, il n'y a encore aucune personne paniquée ayant retrouvé son état normal)
- $Tr = 1$
- $Rtn = 24$ unités de temps

En revanche, pour des valeurs de populations paniquées < 12 , on observe une modification qualitative des trajectoires (Fig. 16). La trajectoire converge vers un point d'équilibre (coordonnées 0,0), mais à l'inverse du cas précédent, il n'y a pas de phase d'émergence de la panique collective. Le passage d'un effectif de 12 à 13 personnes paniquées au démarrage de la simulation dans une foule de 500 personnes ($P_{sp} = 500$) modifie qualitativement la dynamique du système. On retrouve bien là un effet de seuil, avec $P_p = 12$.



Une diffusion de la panique ne peut donc avoir lieu que si le nombre de paniqués est supérieur à la « valeur seuil » au-delà de laquelle il y a émergence de panique collective. Cet effet de seuil a des conséquences concrètes. La panique se diffusant par imitation et contagion, il est indispensable, pour éviter ces mouvements collectifs, de les anticiper en

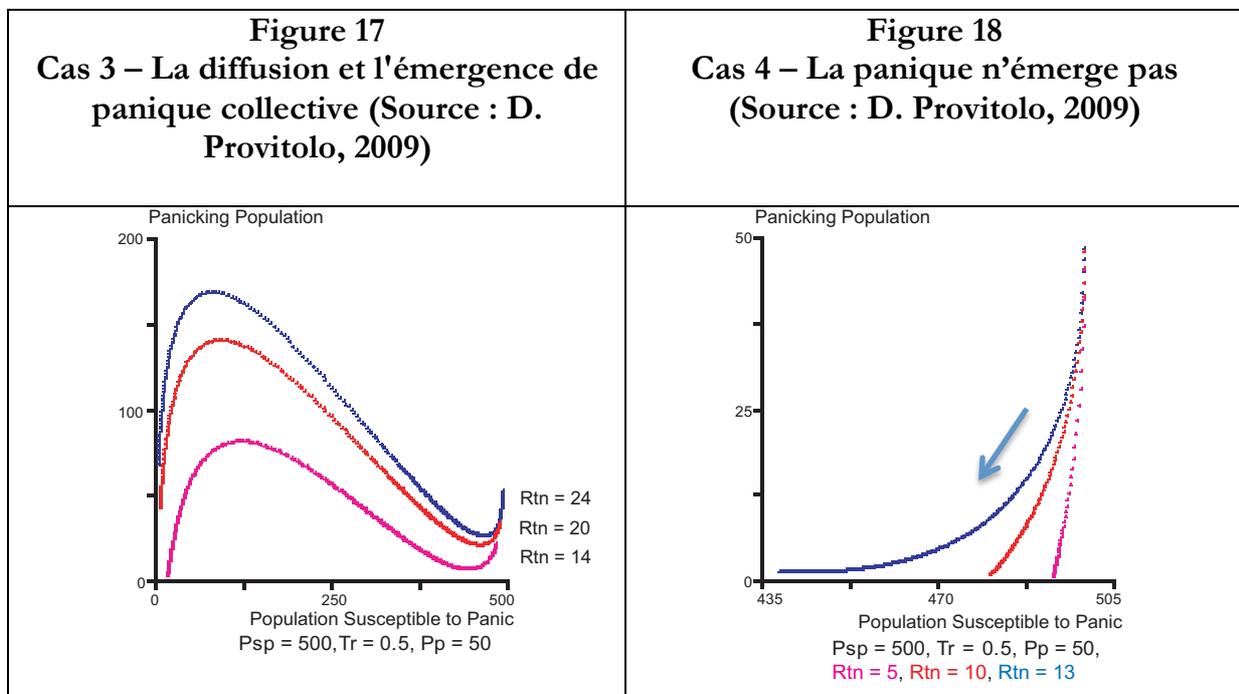
formant et informant les populations. Plus les réactions neurophysiologiques individuelles de panique seront limitées, moins la panique collective aura de chance de prendre forme et d'émerger dans une foule.

Enfin, j'ai souhaité étudier le rôle du taux de transmission de la panique et du temps de retour à la normale. Six essais ont été réalisés :

Cas 3 :

- $P_{sp} = 500$ personnes
- $P_p = 50$
- $P_{np} = 0$ (ce stock est toujours initialisé à 0 car au démarrage de la simulation, il n'y a encore aucune personne paniquée ayant retrouvé son état normal)
- $Tr = 0,5$
- $Rtn = 5, 10, 13, 14, 20, 24$ unité de temps

Pour un « temps de retour à un comportement normal » (Rtn) égal à 14, 20 ou 24 unités de temps, le plan de phase est identique au cas 1 précédent (Fig. 17). Il y a une première phase correspondant à la diminution de la population susceptible de paniquer et de la population paniquée, le passage par un point de bifurcation puis l'émergence de la panique avant d'atteindre une nouvelle bifurcation amenant le système à un nouvel état d'équilibre où les effectifs de P_{sp} et P_p sont nuls. En revanche, les trajectoires sont différentes pour le temps de retour à un comportement normal, équivalent à 5, 10 ou 13 unités de temps. La modification de Rtn , c'est-à-dire du temps mis pour « retrouver ses esprits » influence la proportion des personnes susceptibles de paniquer et paniquées. Il y a là encore un effet de seuil Fig. 18), cette fois non plus sur les conditions initiales mais sur le paramètre de contrôle. La panique ne peut plus se propager.



Conclusion

L'un des avantages de la modélisation en dynamique de système est de permettre de réaliser un modèle et de simuler son comportement, et ce, même en l'absence de données précises. Pour faire démarrer la simulation et obtenir les résultats du fonctionnement du système, il convient d'introduire des données d'entrées. En fournissant au modèle des conditions initiales exactes, on obtiendrait une solution quantitative, permettant de réaliser des prévisions déterministes. Mais la mesure de ces données n'existe pas toujours. C'est le cas du modèle de panique ci-dessus présenté. Quand un phénomène de panique se propage, il n'y a pas de donnée existante sur l'effectif de population qui réagit immédiatement en paniquant. Ce qui « ne signifie nullement... qu'il n'y ait de science que du mesurable » (Granger, 1988). Comme le note Ian Steward (1998) : « au lieu de solutions quantitatives on cherche des solutions qualitatives ». Les sorties graphiques obtenues sont donc tout aussi exactes, mais dans un autre sens. Certes, elles n'autorisent pas de prévision. Mais les courbes obtenues, appréciées de façon qualitative, illustrent très bien le comportement de la propagation de la panique. Nous comprenons la dynamique du système étudié sans disposer de conditions initiales connues avec précision. On ne cherche donc pas une trajectoire du système à partir de conditions initiales précises mais les différentes évolutions possibles du système. L'intérêt de cette modélisation mathématique et informatique est d'être en mesure de mieux décrire ce qu'il se passe ou plus exactement ce qu'il se passerait en modifiant les conditions initiales ou certaines valeurs de paramètres. Ce modèle est ainsi sans doute valide pour des sociétés différentes. Nous avons vu précédemment que les phénomènes de panique sont insolites à plus d'un titre : ils ne sont ni localisés, ni confinés à un milieu particulier, ni le fait d'un aléa spécifique. La panique peut être observée autant lors d'une catastrophe d'origine naturelle que technologique ou sociale, en milieu urbain ou en zone rurale, et n'importe où sur le globe. Elle n'est donc ni spécifique aux pays développés, ni particulière aux pays en voie de développement. La panique est surtout liée au caractère inattendu de l'évènement. Tout au plus, selon l'aléa déclencheur et selon les sociétés, les mouvements de panique seront plus ou moins marqués. Ainsi, dans une société où la population est bien préparée à réagir face à un type d'évènement catastrophique (comme le risque sismique au Japon), la panique serait moins à craindre qu'au sein d'une population peu ou pas formée à gérer la catastrophe (exemple du risque sismique en Turquie). Ce qui, relativement au modèle présenté, revient non pas à modifier le modèle stocks-flux de la panique, mais la gamme des ajustements possibles qu'il convient d'affecter aux différents coefficients régissant le modèle. Cette gamme varie notamment selon la qualité de la perception de l'évènement catastrophique, de la politique de prévention des risques et de gestion des catastrophes.

Mais ce modèle de panique présente deux limites majeures : tout d'abord, il s'agit d'un modèle a-spatial qui n'intègre pas l'effet des disparités territoriales sur la diffusion. Or les effets de forme, par exemple un entonnoir ou un anti-entonnoir routier, un dédale de ruelles, peuvent accroître ou différer un effet de panique. Ce point sera traité dans nos futures recherches (partie 4). De plus, la panique n'est pas la seule réaction humaine observée lors de catastrophes. Ce volet de recherche est abordé ci-après.

Chapitre 6

De l'observation à la simulation de la diversité des comportements humains lors de catastrophes

Les défis scientifiques et sociétaux sont de progresser dans la compréhension et la capacité à anticiper le panel de comportements humains, individuels et collectifs, et leurs trajectoires spatiales, face à des menaces ou des catastrophes de toute origine.

Pour relever ces défis, je coordonne depuis 2013 une recherche interdisciplinaire associant un groupe de chercheurs géographes, psychologues, géophysiciens, mathématiciens et informaticiens. Ce groupe permet d'associer des méthodes d'observation à des méthodes de modélisation, de cerner les réactions aux échelles individuelle et collective, et ce afin de mieux comprendre et expliquer la diversité des comportements humains pouvant se produire lors de catastrophes, quelle que soit leur origine. Ces défis s'inscrivent dans la **Stratégie Nationale de la Recherche (SNR)**, qui encourage l'étude des comportements humains individuels et collectifs face aux crises et la modélisation et simulation des phénomènes critiques, dont font partie les réactions collectives (orientations 39 et 40 de la SNR).

Cette recherche est réalisée dans le cadre de différents projets financés par le CNRS *via* le Peps HuMaIn¹⁵, par l'Université Côte d'Azur *via* l'Idex¹⁶ UCA^{JEDI}, par l'ANR¹⁷ *via* le défi 9 *Liberté et sécurité de l'Europe, de ses citoyens et de ses résidents*, et cofinancés par la Direction Générale de l'Armement (DGA) et le Secrétariat Général de la Défense et de la Sécurité Nationale (SGDSN).

6.1. Une typologie des comportements humains associés aux catastrophes

Afin d'analyser et comparer les réponses comportementales adoptées lors d'évènements catastrophiques, j'ai tout d'abord élaboré, avec ma collègue géographe Edwige Dubos-Paillard, une typologie des comportements humains pouvant se produire dans les zones d'impact et de destruction d'une catastrophe (Provitolo et Dubos-Paillard, 2011 ; Provitolo, Dubos-Paillard *et al.*, 2015).

6.1.1. Une typologie établie sur la base des connaissances en neurosciences et en géographie des catastrophes

Cette typologie a été établie à partir d'une démarche empirique (l'univers de l'observation) en analysant différents types de catastrophes d'origine naturelle, technologique et anthropique, ainsi que des enchaînements d'évènements en différentes zones du monde, et ce afin d'intégrer la diversité des niveaux de vie et des cultures dans l'analyse des comportements. Pour ceci, nous nous sommes appuyées sur les travaux de nos

¹⁵ CNRS – Projets Exploratoires Premier Soutien - HuMaIn (Humanité-Mathématiques - sciences de l'Information) - Titre du projet : les comportements de foule en situation de catastrophe : les comprendre pour mieux les prévenir (financé 2013 et 2014) – PI D. Provitolo.

¹⁶ *COMUE Université Côte d'Azur - AO Idex JEDI* - Titre du projet : observation et modélisation des comportements humains en situation exceptionnelle de catastrophe – (financé 2016-2019) - PI D. Provitolo.

¹⁷ *ANR 2017 - Défi 9* - Titre du projet : Com2SiCa - Comprendre et simuler les comportements humains sur des territoires en situation de catastrophes : de l'analyse à l'aide à la décision (*financé 2018-2021*) - PI D. Provitolo.

prédécesseurs (résultats d'enquêtes, publications d'ouvrages et d'articles), que nous avons complétés par l'analyse des vidéos. Ces dernières constituent, avec le développement d'internet, des sources d'information enrichissantes dans la mesure où elles donnent un aperçu des comportements adoptés lors de catastrophes, tandis que les témoignages recueillis dans les semaines ou les mois qui suivent l'évènement comportent forcément une part de subjectivité dont l'importance est variable selon les individus. Les évènements retenus¹⁸ (catastrophes technologiques de Toulouse -2001- et Bhopal -1984-, catastrophe nucléaire de Three Mile Island -1979-, tremblements de terre de Loma Prieta -1989-, Northridge -1998-, Haïti -2010-, catastrophes en chaîne du Japon -2011-, coulée de boue de Vargas -1999-, Tsunami en Indonésie -2004-, éruption volcanique de Karthala -2006-, Ouragan Katrina -2005-, etc.) ont servi de catalyseur pour observer comment les individus, les groupes et les organisations (celles qui préexistent à l'évènement ou qui émergent) font face à ces situations extrêmes et pour identifier les types de comportements adoptés.

Cette typologie a été élaborée pour répondre à deux questions principales :

- A quels comportements faudra-t-il faire face ?
- Comment organiser la connaissance dans le but de la modélisation mathématique des dynamiques et séquences comportementales ?

Cette typologie a été réalisée non pas selon l'origine de l'évènement (naturel, anthropique) mais au regard d'un continuum temporel comprenant le moment qui précède le choc (si celui-ci est annoncé), le choc et la phase postimmédiate. A chacune des phases correspond un certain nombre de comportements susceptibles d'être observés. Ces derniers ne sont pas spécifiques à un niveau d'analyse, on peut les observer pour un individu, un groupe ou une foule. De même, tous ne sont pas systématiquement présents dans les situations de catastrophe que nous avons pu étudier.

La construction de la typologie s'est effectuée au regard de trois considérations :

- les phases temporelles de la catastrophe

En tant que réaction à un environnement, les comportements humains sont souvent identifiés à partir de l'observation d'un évènement spécifique, évènement lui-même classé selon l'origine du risque (on distingue classiquement les risques d'origine naturelle ou technologique, les risques de société et du vivant).

Mais, pour comprendre les réactions comportementales en situation de stress, le critère de l'origine de la menace est trop restrictif. Il doit être mis en regard avec les phases temporelles de la catastrophe, non pas celles de ses mécanismes, mais celles liant les victimes à l'évènement. Cette typologie a ainsi été réalisée au regard d'un continuum temporel comprenant le moment qui précède le choc (si celui-ci est annoncé), le choc et sa phase postérieure. Les périodes suivantes de restauration (ou relèvement) consistant principalement à restaurer les fonctions essentielles de la société (les services publics notamment), et de reconstruction visant à faire disparaître les effets de la catastrophe, ne sont pas traitées dans la mesure où elles se caractérisent par des comportements plus courants, plus proches de ceux observés avant la catastrophe. Ces derniers sont animés

¹⁸ L'analyse présentée exclut les crises sociales.

par une plus grande variété de motivations, même s'ils doivent toujours composer avec les effets de la catastrophe (habitations endommagées, difficultés pour se déplacer, stress).

- les connaissances des neurosciences

Le but de cette recherche est de croiser les observations faites sur les comportements humains associés aux catastrophes avec les connaissances des psychologues, des neuroscientifiques et des géographes (Fig. 20). Que se passe-t-il dans notre cerveau lorsque nous sommes stressés ? Ce que nous savons aujourd'hui, c'est qu'il y a différentes régions cérébrales : le cerveau reptilien gère les comportements instinctifs, le cortex préfrontal est responsable des comportements contrôlés et le cerveau émotionnel, dans le système dit limbique, gouverne les comportements émotionnels (Fig. 19). Des résultats plus récents tendent d'ailleurs à démontrer que l'émotion est omniprésente dans le cerveau, y compris dans les régions corticales (Sander, 2011). En l'état de cette recherche, les émotions sociales n'ont pas été intégrées à l'étude, bien que permettant d'adapter le comportement à la situation. Cet aspect sera relevé dans les prochaines recherches, grâce à la collaboration de collègues psychologues de l'Université de Nantes au projet Com2SiCa (partie 4).

Figure 19 – Les zones cérébrales impliquées dans les réponses comportementales (Réalisation : D. Provitolo, d'après Laborit, 1994 ; George et Gamond, 2011 ; Soussignan 2011 ; Sander, 2001 ; Brosch et Sander 2011)

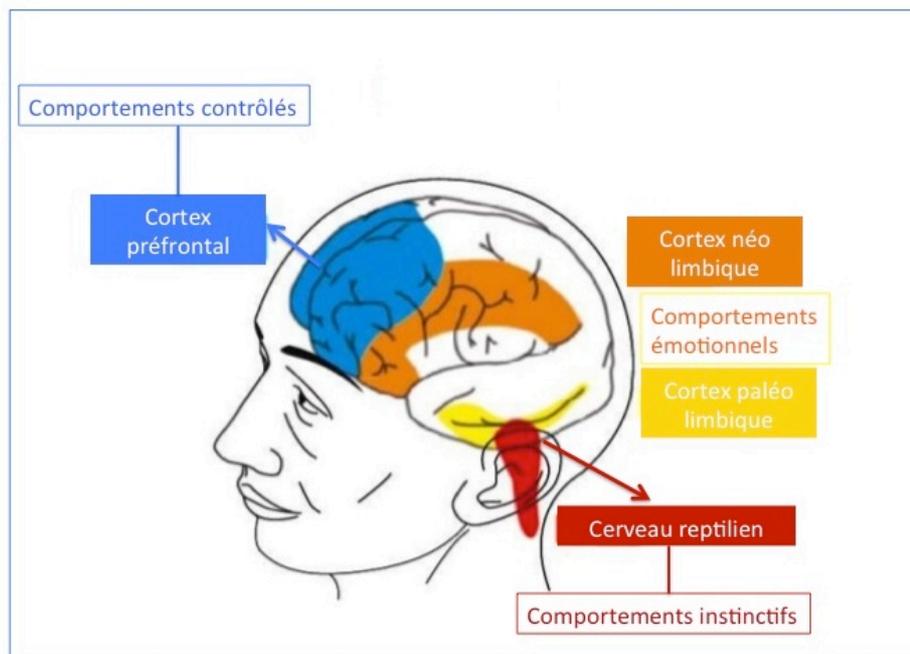
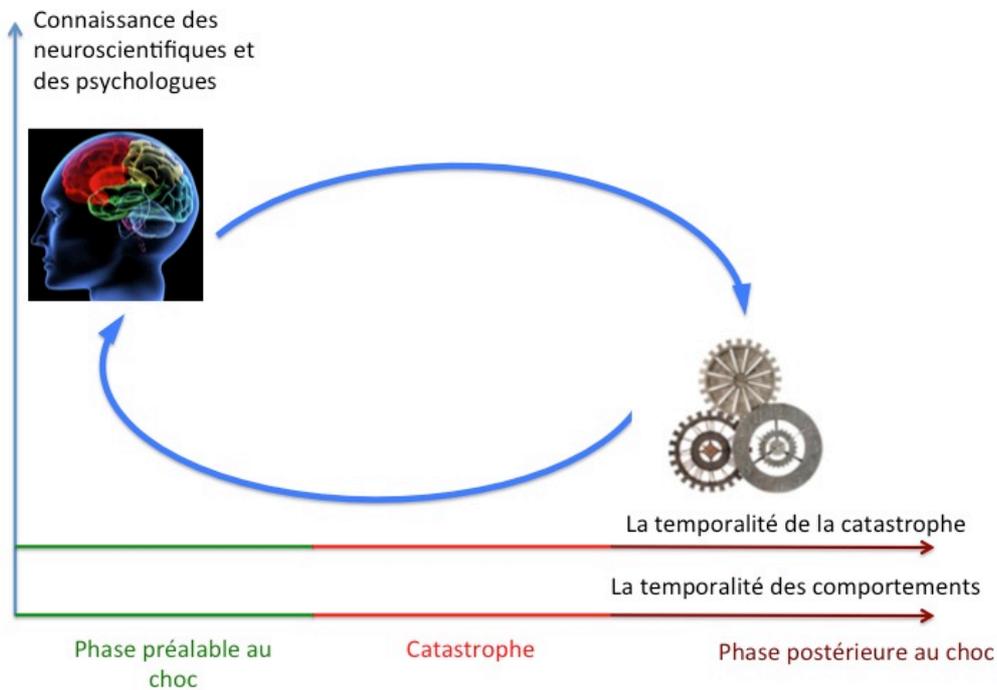


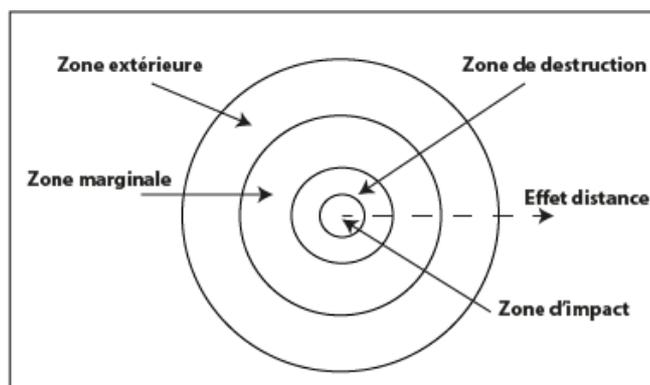
Figure 20 - La combinaison des connaissances issues des neurosciences et de la géographie des risques (Source : D. Provitolo et R. Lozi, 2018)



- les zones de la catastrophe

Les comportements humains diffèrent également en fonction du zonage de la catastrophe. C. Chandessais (1979) distingue pour le risque sismique quatre zones concentriques (Fig. 21), respectivement nommées : zone d'impact, de destruction, marginale et extérieure. Ce zonage, appliqué spécifiquement au tremblement de terre, peut s'étendre à d'autres événements, notamment aux inondations par débordement de cours d'eau ou par ruissellement. Cependant, des sinistres ayant une empreinte spatiale limitée (exemple des naufrages, des incendies dans un espace clos type salle de spectacle) entrent difficilement dans cette catégorisation en zone. Par exemple, lors d'un naufrage, la zone d'impact se confond avec la zone de destruction. Ce fut bien le cas lors du naufrage du Concordia au large des côtes italiennes en 2012. Nous nous intéressons uniquement aux comportements ayant lieu dans les zones d'impact et de destruction. Dans la zone d'impact, les destructions matérielles sont très importantes, le nombre de victimes est élevé et la désorganisation sociale est la plus grande. Dans la zone de destruction, les dégâts matériels sont très importants mais où le nombre de blessés est moindre et l'organisation sociale très perturbée. Nous n'avons pas retenu les zones marginale et extérieure qui sont généralement peu impactées directement par l'évènement.

Figure 21 - Les zones de la catastrophe lors d'un tremblement de terre (Source : C. Chandessais, 1979)



6.1.2. La présentation de la typologie

La figure 22 restitue les résultats de la démarche. Cette typologie est ainsi organisée selon deux axes : les zones cérébrales impliquées dans les réponses comportementales d'une part, les phases temporelles de l'évènement et son alerte d'autre part.

Ainsi,

a) au regard des zones cérébrales impliquées dans les réponses comportementales, ont été dissociés :

Les comportements instinctifs : ils sont traités par la zone reptilienne du cerveau qui gère les Etats d'Urgence de l'Instinct (Laborit, 1994). Ils regroupent les comportements de fuite instinctive et de panique, de sidération, de lutte instinctive mais aussi les comportements d'automate (Vermeiren, 2007).

Les comportements contrôlés : ils s'agit de comportements raisonnés, gérés par le cortex préfrontal (George et Gamond, 2011) qui prend le relais du cerveau reptilien afin d'adapter, de façon réfléchie et non plus instinctive, les réactions à la perturbation. Cela concerne notamment les évacuations préventives ou spontanées et les réactions de fuite réfléchies qui y sont associées, la recherche des proches ou des secours, les comportements de lutte contre les impacts potentiels du danger, de confinement (par exemple opération de calfeutrage des ouvertures des bâtiments, constitution de stocks d'eau et de nourriture), de mise à l'abri (par exemple rejoindre son domicile), et plus rarement les comportements dits « déviants » (ex. pillages, vols) ou de curiosité. Il faut cependant garder à l'esprit que des comportements raisonnés peuvent être inadaptés à la situation. Ce fut par exemple le cas lors des inondations d'octobre 2015 sur le littoral azuréen où un comportement spontané a été de vouloir sortir les véhicules des garages inondés pour les mettre en sûreté. L'issue a été tragique car les personnes ont été noyées dans les sous-sols. Des comportements identiques avaient déjà été observés lors d'inondations dans le Sud-Ouest de la France (Becerra *et al.* 2013). Lors de vents violents, il peut également arriver que des personnes sortent en pleine tempête pour recouvrir leur maison d'une bâche (Maif, *Catastrophes naturelles, les bons réflexes*), s'exposant ainsi fortement à la menace.

b) au regard des phases temporelles de la catastrophe et du rôle de l'alerte

La temporalité de l'évènement et son annonce permettent de dissocier trois phases pour lesquelles les réactions humaines sont spécifiques :

- la phase préalable au choc (si celui-ci est annoncé),
- la phase du choc,
- la phase postérieure au choc.

A chacune de ces phases correspond un certain nombre de comportements susceptibles d'être observés dans les zones directement impactées. Des comportements spécifiques apparaissent et se diversifient selon que l'évènement est annoncé et donc anticipé (par exemple ouragans, tempêtes, certaines éruptions volcaniques et inondations, télétsunamis¹⁹) ou non (par exemple tsunamis locaux, tremblements de terre, explosions industrielles, nucléaires, ruptures de barrage). **Dans le cas d'un évènement annoncé, on observe des comportements raisonnés** ayant notamment pour finalité de se préparer au danger, d'y faire face (évacuation organisée, lutte réfléchie contre les effets potentiels du désastre en déployant par exemple des systèmes de protection inondation pour protéger une façade, le pourtour d'un bâtiment etc.), tandis que **dans le cas d'un évènement qui survient de façon inattendue**, du fait de l'effet de surprise et de peur, **les réactions sont plus instinctives, immédiates et automatiques** (panique sidérante, fuite panique), tout au moins dans les premiers instants du choc.

En prenant appui sur les recherches menées en médecine de catastrophe (Noto *et al.*, 1994), la typologie intègre également une dimension spatiale en associant à chaque comportement une ou plusieurs formes de déplacement. Sont ainsi distingués les mouvements de convergence vers la zone d'impact et de destruction, ceux qui s'en éloignent, ceux qui s'inscrivent à l'intérieur de celle-ci ainsi que l'absence de déplacement.

Selon la figure 22, il ressort que durant la phase qui précède le choc, lorsque l'évènement menaçant est annoncé mais temporellement éloigné, les comportements spécifiques à celui-ci se mettent en place progressivement : on a pu observer des mouvements d'évacuation spontanée ou organisée (Three Mile Island, ouragan Katrina), des comportements de lutte contre les impacts potentiels du danger (par exemple, renforcement des digues lors de tornade ou d'inondation), de confinement et de mise à l'abri (par exemple, rejoindre son domicile) et de recherche des proches (par exemple, aller chercher ses enfants à l'école). Lorsque l'évènement est imminent et personnellement menaçant (par exemple, un danger cyclonique se confirme), d'autres comportements apparaissent : l'immobilisme contraint ou choisi, la fuite (fuite panique ou fuite réfléchie), l'assistance et les secours d'urgence. Les déplacements occasionnés peuvent favoriser des phénomènes de regroupements au sein de structures d'accueil ou dans des lieux jugés sécurisés.

Durant la phase du choc, les comportements adoptés durant la phase précédente peuvent être conservés (confinement, maintien à l'écart après évacuation...) ou évoluer en fonction de la situation. Des mouvements de convergence (recherche des proches, assistance/secours) mais surtout d'éloignement (fuite, fuite panique) sont observés. Ils peuvent aussi donner lieu à des regroupements dans des lieux jugés sûrs par les individus. Plusieurs comportements tels que l'immobilisme contraint (enseveli sous un bâtiment) ou choisi (refus d'évacuation), la sidération (incapacité à réagir), le confinement ou la mise à l'abri, (dynamique de déplacement visant à rejoindre son domicile, à gagner un abri etc.), la recherche des secours restent cantonnés au sein de la zone touchée ou ne donnent pas lieu à un déplacement. Les phénomènes d'imitation, qui peuvent se traduire différemment

¹⁹ Les télétsunamis sont capables de détruire les côtes à des milliers de kilomètres de la source.

au niveau spatial, favorisent la constitution de groupe. Ces différents comportements sont une réponse plus ou moins adaptée à la catastrophe, ils modifient ainsi la vulnérabilité de la population ou au contraire sa résilience. Leur importance respective varie notamment en fonction du type de catastrophe, de ses dimensions spatiales et temporelles, des dispositifs d'alerte, de la visualisation de l'évènement et de l'accès à l'information.

Figure 22 - Une typologie des comportements humains selon la temporalité de la catastrophe (Source : Provitolo et Dubos-Paillard, 2011 ; Provitolo, Dubos-Paillard et al. 2015)

| Dimension temporelle Principaux types de comportements | Phase préalable au choc → Choc → Phase postérieure au choc | | | |
|--|--|---|---------------------------------|----------------------|
| | Danger distant annoncé | Danger imminent annoncé et personnellement menaçant | Danger présent prévu ou imprévu | Immédiat post-impact |
| Comportements instinctifs | | | | |
| ° Fuite panique | | X (→) | X (O→) | X (→) |
| ° Sidération | | | X (O) | X (O) |
| ° Lutte instinctive | | | X (O) | |
| ° Agitation | | X (O) | X (O) | X (O) |
| ° Comportement d'automate | | X (O→) | X (O→) | X (O→) |
| Comportements acquis et intelligents | | | | |
| ° Evacuation /Fuite | X (→) | X (→) | X (→) | X (→) |
| ° Confinement/Mise à l'abri | X (O) | X (O) | X (O) | X (O) |
| ° Lutte réfléchie contre les effets du désastre (envisagés ou réels) | X (O←) | X (O←) | X (O) | X (O←) |
| ° Immobilisme contraint ou réfléchi | | X (O) | X (O) | X (O) |
| ° Recherche des proches | X (O←) | X (O←) | X (O←) | X (O←) |
| ° Recherche de secours | | | X (O) | X (O→) |
| ° Entraide (Assistance , secours d'urgence) | | X (O←) | X (O←) | X (O←) |
| ° Curiosité | | | X (←) | X (O←) |
| ° Comportements déviants (pillage, vol, violence ...) | | | | X (O←) |
| ° Retour sur le lieu d'habitation / de travail | | | | X (←) |

X Comportement susceptible d'être observé
 ← Déplacement vers la zone d'impact et la zone de destruction effective ou potentielle
 → Eloignement de la zone d'impact et la zone de destruction effective ou potentielle
 O Absence de déplacement ou déplacements au sein de la zone d'impact et la zone de destruction

La phase qui suit le choc ou d'immédiat postimpact voit perdurer la plupart des comportements observés lors du choc dans des proportions qui évoluent cependant. Ainsi les comportements d'assistance et de secours, de lutte contre les effets de la catastrophe constituent des comportements caractéristiques des situations postcatastrophiques (Quarantelli, 2008 ; Fischer 1998), tandis que les comportements instinctifs tels que la sidération ou la fuite panique, même s'ils perdurent un temps, tendent à disparaître. Cette phase se caractérise également par l'apparition de comportements dit « antisociaux » pour nommer des actes de pillages, de vols etc. Ce type de comportements est souvent le fait d'une minorité mais il est fortement relayé par les médias. Les motivations diffèrent grandement entre les individus dans le dénuement qui cherchent à faire face aux conséquences de l'évènement (recherche de vêtements, eau et nourriture) et les véritables pilleurs à la recherche de sources d'enrichissement.

6.1.3. Les apports et les limites de la typologie

Cette typologie est certainement imparfaite mais elle permet :

- de porter un nouveau regard sur les réactions humaines et d'établir des comparaisons de réactions pour des événements ayant *a priori* peu de points communs (par exemple un acte terroriste *versus* un séisme *versus* une explosion chimique),
- d'intégrer la chronologie de l'évènement comme un rôle clé dans les réponses apportées à l'évènement et à la situation,
- d'identifier le panel de comportements pouvant être observés, et ce quelle que soit l'origine de la catastrophe,
- d'identifier les grandes trajectoires spatiales pouvant être associées aux comportements humains, afin de les intégrer ultérieurement dans un modèle mathématique spatialisé.

Cette récolte d'informations sur les comportements individuels et collectifs des personnes fournit essentiellement une information statique, ponctuelle et contextualisée. Elle permet difficilement d'embrasser la diversité des réactions humaines, adaptées ou non à la situation, pouvant se produire lors d'une catastrophe. L'observation de ce nombre restreint de comportements humains lors de catastrophes ne fournit qu'une connaissance fragmentaire, fragmentaire au sens où « les fragments ont été recueillis au hasard des circonstances » (Regnier, 1968), où l'observation fournit peu d'information sur les dynamiques des séquences comportementales. Or, les recherches en psychologie et en neurosciences enseignent que l'être humain reste rarement figé dans le même état comportemental du début à la fin d'une catastrophe ; on assiste plutôt à un enchaînement de réactions comportementales. Les premières relèvent le plus souvent de réactions instinctives (Laborit, 1994) ou réflexes, ces dernières laissant ensuite la place aux réactions raisonnées (George et Gamond, 2011) en fonction des régions du cerveau impliquées dans le traitement de l'information (cerveau reptilien, limbique ou néocortex) (Noto *et al.*, 1994 ; Soussignan 2011 ; Brosch et Sander 2011). Ce sont justement ces séquences comportementales, ces enchaînements de comportements instinctifs ou raisonnés provoqués par un évènement catastrophique qui retiennent mon attention.

Se pose alors la question : comment mieux cerner ces réactions humaines, qui, complexes et difficiles à reproduire artificiellement (Crocq, 1994), sont hors de portée des démarches expérimentales de type *in vivo* ou *in vitro*. Face à ce constat, j'ai souhaité mobiliser des méthodes alternatives, basées sur les approches mathématiques et les méthodologies *in silico*. Il s'agit de créer des modèles mathématiques à partir desquels on simule des scénarios d'évolution en faisant varier tels ou tels paramètres, telles ou telles conditions initiales. L'ordinateur devient alors le laboratoire virtuel du chercheur et la simulation s'entend comme une expérimentation sur un modèle, une expérience numérique (Colonna, 1993). On retrouve là l'idée d'ordinateur microscope de J. de Rosnay (1975), au sens où l'ordinateur, grâce à ses capacités de simulation, est un « *outil d'observation directe de la complexité* » (de Rosnay, 1995).

Devant cette complexité des phénomènes à modéliser, le partenariat avec les collègues mathématiciens, informaticiens et psychologues s'impose. Il va permettre de comprendre

comment se distribuent les comportements collectifs au sein d'une population touchée par une catastrophe soudaine et imprévue.

6.2. Le modèle mathématique PCR (Paniques-Contrôles-Réflexes)

Dans la continuité de ces recherches, il s'agissait donc de dépasser d'une part l'aspect statique de la typologie des comportements humains (Fig. 22) et d'autre part la seule modélisation d'un comportement unique celui de la panique (Fig. 14), modélisation qui ne traduit pas la diversité des réactions comportementales observées lors de catastrophes.

6.2.1. L'élaboration du modèle mathématique, un dialogue interdisciplinaire

Les problèmes auxquels je souhaitais répondre consistaient à :

- prendre en compte les contraintes de la situation dans laquelle les réactions comportementales vont se situer,
- analyser les réactions comportementales au regard du continuum temporel de l'évènement et de celui de la dynamique temporelle propre à chaque type de réactions humaines,
- prendre en compte les séquences comportementales, en analysant les réactions humaines comme une chaîne de comportements apparaissant dans un certain ordre : le passage du comportement du quotidien aux comportements réactifs en situation de catastrophe, puis le retour aux comportements du quotidien lorsque le site sinistré et ses environs retrouvent un fonctionnement proche d'un nouvel équilibre.

Une fois les problèmes posés, la phase suivante est celle de la formalisation mathématique. Cette phase a nécessité un dialogue entre thématiciens, mathématiciens et informaticiens afin de poser les problèmes du niveau approprié d'abstraction dans un modèle et d'échelle (spatiale, temporelle, niveau d'organisation) de représentation (Varenne et Silberstein, 2013). Nous avons trouvé un compromis intellectuel entre thématiciens et modélisateurs, afin de garder un équilibre entre la diversité des réactions comportementales retranscrites dans la typologie, leur cohérence dans la construction du modèle et la faisabilité des calculs.

Pour la modélisation mathématique, nous avons retenu trois métacomportements dits **Paniques**, **Contrôles** et **Réflexes** (modèle **PCR**) qui ont été identifiés comme jouant un rôle majeur lors de catastrophes. Ainsi,

- *les comportements Réflexes* : ils correspondent à l'ensemble des comportements instinctifs présentés dans la typologie. Les réactions réflexes déclenchées lors d'un danger permettent à l'organisme de réagir extrêmement vite, soit en s'enfuyant le plus rapidement possible, soit en luttant de façon automatique, soit en étant sidéré et physiquement incapable de se mouvoir dans l'espace ou ayant pour seule mobilité un lent déplacement centrifuge (Crocq, 1994). On a pris ici le parti de « globaliser » tous ces comportements réflexes, et ce malgré leur diversité, exception faite des comportements de panique qui font l'objet d'une analyse spécifique.

- *les comportements de Panique* : il s'agit d'un comportement mimétique dont l'extinction est plus liée à sa dynamique interne qu'à l'éloignement d'avec le danger (Crocq, 2013) (cf. chapitre 5).
- *les comportements Contrôlés* : ils sont régis par le cortex préfrontal qui prend le relais du cerveau reptilien (Berthoz et Grèzes, 2011). Les réactions réflexes prises sous le coup de la surprise et de l'irruption du danger (Crocq, 1994) laissent ainsi place aux réactions contrôlées, raisonnées. On a pris ici le parti de « globaliser » tous les comportements sociaux raisonnés, et ce malgré leur diversité (par exemple évacuation, confinement, entraide).

De plus, nous avons fait des choix concernant :

- la nature de l'aléa : seuls les événements imprévus, soudains et à dynamique rapide, tels que les tsunamis locaux, les attentats ou les explosions ne pouvant faire l'objet d'alerte à la population sont retenus dans le cadre de cette modélisation. En appui des résultats obtenus dans le cadre du projet européen Astarte (cf. partie 3), les tsunamis locaux en Méditerranée ont servi de scénario de référence. L'effet de surprise est total, il n'y a pas de signe précurseur directement lié à la menace, ni possibilité d'alerte préventive par les autorités pour évacuer la population et permettre à cette dernière d'adopter un comportement préventif (mise à l'abri avant l'arrivée de la menace, lutte préventive etc.).
- les phases temporelles de la catastrophe : seules les comportements se produisant pendant la catastrophe, et donc en réaction à l'évènement, sont analysés,
- le zonage spatial : le parti pris de cette recherche est de focaliser l'attention sur les réactions se produisant au sein de la zone d'impact et de destruction.

Ces choix ne sont pas anodins. A ce stade de la modélisation, nous avons opté pour l'intégration, dans le modèle mathématique, des paramètres généraux, c'est-à-dire non spécifiques à un territoire ou à des caractéristiques sociales, économiques et culturelles (par exemple l'âge, le sexe, les aires culturelles, les niveaux de revenu, de richesse), ces dernières ne jouant d'ailleurs pas un rôle clé durant la menace mais davantage lors des phases *ante-* et *postcatastrophe* comme l'ont démontré D.D. Baumann et J.H. Sims (1974).

6.2.2. Les résultats de recherche

Durant la première étape de cette recherche, seules les dynamiques temporelles de ces trois réactions humaines (durée, changement d'état, émergence de comportements collectifs) et de leurs interactions ont été modélisées. La modélisation par EDO consiste donc à décrire les dynamiques d'imitation et de contagion comportementale dans le temps entre des classes de comportements collectifs.

6.2.2.1. L'élaboration d'un modèle graphique issu du dialogue interdisciplinaire

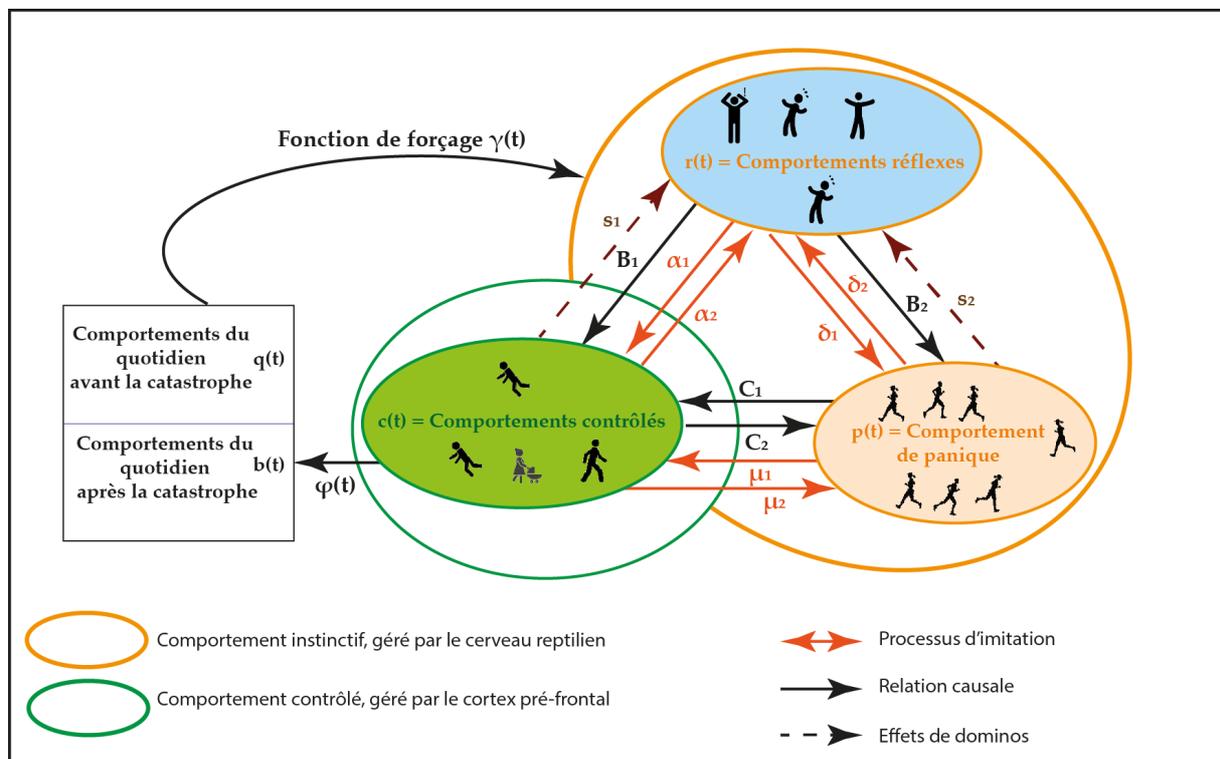
Pour des soucis pédagogique et de compréhension pluridisciplinaire entre géographes, mathématiciens et informaticiens, nous avons coconstruit un modèle graphique (Fig. 23) décrivant les trois métacomportements des populations en situation exceptionnelle de catastrophe et leurs relations. Ce modèle graphique a servi de base à la réalisation d'un modèle mathématique de cinq équations différentielles ordinaires (modèle **PCR**, acronyme de « Comportements de **P**anique, **C**ontrôlés, **R**éflexes »), simulant l'évolution et les modes de propagation des comportements dans le temps depuis une première phase

dite « réflexe », à une seconde phase dite « contrôlée » en fonction du type de menace (Equation 1).

Dans ce modèle sont distingués les comportements du quotidien $q(t)$ et $b(t)$, les comportements émotionnels non contrôlés $r(t)$ et $p(t)$ gérés par la zone reptilienne du cerveau (patatoïdes jaune et bleu – Fig. 23) et les ceux contrôlés $c(t)$ gérés par le cortex préfrontal (patatoïde vert – Fig. 23). Lorsque la catastrophe se déclenche, la population, initialement en $q(t)$ évolue, selon différentes modalités, au sein de ces trois sous-populations r , p et c . Nous posons comme hypothèse que, du fait de la nature soudaine et imprévue de l'aléa, l'ensemble de la population impactée va adopter une réaction comportementale réflexe $r(t)$ prise sous le coup de la surprise et de l'irruption du danger (par exemple sidération, lutte instinctive), avant de transiter vers des comportements de panique $p(t)$ ou des comportements contrôlés $c(t)$ (par exemple fuite raisonnée, confinement).

Durant l'évènement, la dynamique des réactions comportementales est matérialisée par des transitions entre ces trois sous-populations. Ont été distinguées les transitions récurrentes à toutes les catastrophes et réactions comportementales, comme les processus endogènes de type neurophysiologique (B_1 , B_2 , C_1 , C_2), les processus d'imitation et de contagion (α_1 et α_2 , δ_1 et δ_2 , μ_1 et μ_2), et les transitions utilisées spécifiquement pour traiter des effets dominos (s_1 et s_2), ces derniers ralentissant le retour à un comportement « pseudo-normal » en $b(t)$. Le déclenchement de la catastrophe est représenté par une fonction de forçage $\gamma(t)$ dont la forme pourra varier selon les spécificités de l'aléa (aléa à cinétique rapide ou lente).

Figure 23 - La formalisation graphique de trois méta-comportements lors de catastrophes (d'après : D. Provitolo, E. Dubos-Paillard *et al.* 2015)



Le tableau ci-après présente l'ensemble des éléments du modèle PCR.

Tableau 1 - L'explication du modèle PCR (Réalisation : D. Provitolo pour la recherche Com2SiCa, 2019)

| Les variables d'état | Qualification des variables et fonctions |
|-----------------------------------|---|
| $q(t)$ | La densité de population dans son comportement quotidien au démarrage de la simulation à un instant t . |
| $b(t)$ | La densité de population qui retrouve un comportement « pseudo-normal » à un instant t après avoir réagi à l'évènement. Cette population, à l'abri, ne « reboucle » plus dans le système. |
| $r(t)$ | La densité de population en comportements « Réflexes » à un instant t |
| $c(t)$ | La densité de population en comportements « Contrôlés » à un instant t |
| $p(t)$ | La densité de population en comportements « de Panique » à un instant t |
| Les relations de causalité | |
| B_1, B_2 | Comportements endogènes : des réflexes vers les comportements contrôlés ou des réflexes vers les comportements de panique Une fois que la population se trouve dans le comportement réflexe, une partie B_1 peut évoluer vers des comportements contrôlés, une autre partie B_2 vers des comportements de panique. Ces évolutions sont proportionnelles à la densité de personnes en comportements réflexes. |
| C_1 | Comportements endogènes : de la panique vers les comportements contrôlés Une partie C_1 de la population paniquée peut passer à un comportement contrôlé, proportionnellement à la densité de personnes prises de panique. |
| C_2 | Comportements endogènes : des contrôlés vers les comportements de panique Une partie C_2 de la population contrôlée peut passer à un comportement paniqué, proportionnellement à la densité de contrôlés. Remarquons que pour C_1 et C_2 , le modèle autorise plusieurs |

| | |
|--|--|
| | passages de contrôlés vers paniqués et <i>vice-versa</i> au cours du temps. |
| Le déclenchement et la fin du processus | |
| $\gamma(t)$ | Le déclenchement de l'aléa s'exprime par la fonction $\gamma(t)$ qui permet de caractériser le type d'évènement. Cette fonction de forçage peut être discrète ou continue. Par exemple, un tsunami local peut être assimilé à un évènement de type forçage discret (quand il n'y a pas de signe annonciateur et donc absence d'annonce de l'arrivée de l'évènement). En revanche une inondation de plaine qui est annoncée plusieurs heures à l'avance sera modélisée par un forçage lent (continu). |
| $\varphi(t)$ | Cette fonction formalise le passage des comportements contrôlés $c(t)$ aux comportements « pseudo-normaux » $b(t)$. |
| Les boucles de rétroaction | On matérialise les boucles de rétroaction qui permettent de maintenir le stress de la perception de la catastrophe par les flèches étiquetées $s_1(t)$ et $s_2(t)$, ces fonctions agissent de façon similaire à $\gamma(t)$ |
| $s_1(t)$ | Des comportements contrôlés vers les comportements réflexes lorsqu'un nouvel évènement perturbateur se produit |
| $s_2(t)$ | Des comportements de panique vers les comportements réflexes lorsqu'un nouvel évènement perturbateur se produit |
| Les processus d'imitation et de contagion | |
| α_1 et α_2, ξ | Traduisent le processus exogène de contagion émotionnelle entre les comportements réflexes et les comportements contrôlés, processus qui est modélisé à l'identique d'une propagation épidémiologique. L'imitation s'effectue dans les deux sens et est modélisée par la fonction non linéaire $F(r,c)$ multipliée par les variables r (densité de personnes en réflexes) et c (densité de personnes contrôlées). Le comportement de la majorité influence celui de la minorité. La fonction $F(r,c)$ globalise les paramètres α_1 et α_2 et la fonction ξ . |
| δ_1 et δ_2, ξ | Traduisent le processus exogène de contagion émotionnelle entre les comportements réflexes et les comportements de panique, processus qui est modélisé à l'identique d'une propagation épidémiologique. L'imitation s'effectue dans les deux sens et est modélisée par la fonction non linéaire $G(r,p)$ multipliée par les variables r (densité de personnes en réflexes) et p (densité de personnes paniquées). Le comportement de la |

| | |
|-------------------------|--|
| | majorité influence celui de la minorité. La fonction $G(r,p)$ a un rôle similaire à la fonction $F(r,c)$. |
| μ_1 et μ_2, ξ | Traduisent le processus exogène de contagion émotionnelle entre les comportements contrôlés et les comportements paniqués, processus qui est modélisé à l'identique d'une propagation épidémiologique. L'imitation s'effectue dans les deux sens et est modélisée par la fonction non linéaire $H(c,p)$ multipliée par les variables c (densité de personnes contrôlées) et p (densité de personnes paniquées). Le comportement de la majorité influence celui de la minorité. La fonction $H(c,p)$ a un rôle similaire à la fonction $F(r,c)$. |

6.2.2.2. La construction d'un modèle mathématique original

La modélisation macroscopique basée sur la théorie des systèmes dynamiques non linéaires, de type prédateur-proie, a été privilégiée.

Les équations du modèles RCP (en termes de densité) sont les suivantes :

$$\begin{aligned}
\dot{r}(t) &= \gamma(t)q(t) - (B_1 + B_2)r(t) + s_1(t)c(t) + s_2(t)p(t) \\
&\quad + F(r(t), c(t))r(t)c(t) + G(r(t), p(t))r(t)p(t) \\
\dot{c}(t) &= -\varphi(t)c(t) + B_1r(t) + C_1p(t) - C_2c(t) - s_1(t)c(t) \\
&\quad - F(r(t), c(t))r(t)c(t) + H(c(t), p(t))c(t)p(t) \\
\dot{p}(t) &= B_2r(t) - C_1p(t) + C_2c(t) - s_2(t)p(t) - G(r(t), p(t))r(t)p(t) \\
&\quad - H(c(t), p(t))c(t)p(t) \\
\dot{q}(t) &= -\gamma(t)q(t) \\
\dot{b}(t) &= \varphi(t)c(t)
\end{aligned}$$

Les trois fonctions d'imitations $F(r,c)$, $G(r,p)$, $H(c,p)$ sont définies par les relations suivantes :

$$\begin{cases}
F(r, c) = -\alpha_1 \xi \left(\frac{c}{r + \varepsilon} \right) + \alpha_2 \xi \left(\frac{r}{c + \varepsilon} \right) \\
G(r, p) = -\delta_1 \xi \left(\frac{p}{r + \varepsilon} \right) + \delta_2 \xi \left(\frac{r}{p + \varepsilon} \right) \\
H(c, p) = -\mu_1 \xi \left(\frac{p}{c + \varepsilon} \right) + \mu_2 \xi \left(\frac{c}{p + \varepsilon} \right).
\end{cases}$$

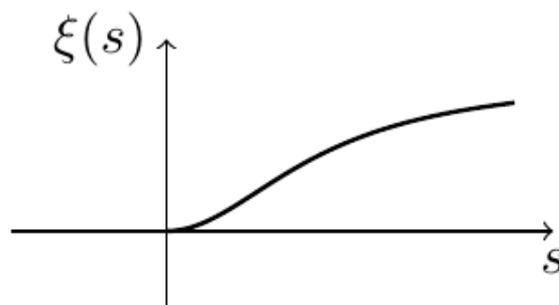
La fonction $\xi(s) = \frac{s^2}{1+s^2}$, $s \in \mathbb{R}$ où s représente l'un des rapports d'états comportementaux, c'est-à-dire, $\frac{r}{c}, \frac{c}{r}, \frac{p}{r}, \frac{r}{p}, \frac{p}{c}, \frac{c}{p}$, est représentée à la figure 24.

ξ révèle les « rapports de force » entre deux états comportementaux qui interagissent avec le postulat que « le plus fort gagne ».

Considérons la fonction F . S'il y a peu de contrôlés et beaucoup de réflexes, le rapport $\frac{c}{r}$ est faible, donc la valeur de la fonction $\xi \frac{c}{r}$ est très faible également (partie gauche de la courbe). A contrario, la valeur du rapport $\frac{r}{c}$ sera grande, donc celle de la fonction $\xi \frac{r}{c}$ également (partie droite de la courbe). Dans ce cas, la valeur de $F(r,c)$ sera positive, induisant une imitation dans le sens contrôlé vers réflexe (dans l'équation de \dot{r} , F est positif, donc on fait augmenter la population de r au dépend des c).

Ainsi, $F(r,c)rc$ définit la fonction d'imitation avec : $F(r,c)$ qui traduit la proportion de populations changeant d'état comportemental dans un sens ou dans un autre (c'est-à-dire de réflexe vers contrôlés et *vice versa*) et rc qui traduit les interactions entre les populations en état réflexe et celles en état contrôlé.

Figure 24 - La fonction d'imitation (Réalisation : N. Verdière pour la recherche Com2SiCa, 2019)



6.2.2.3. Les simulations numériques pour valider le modèle

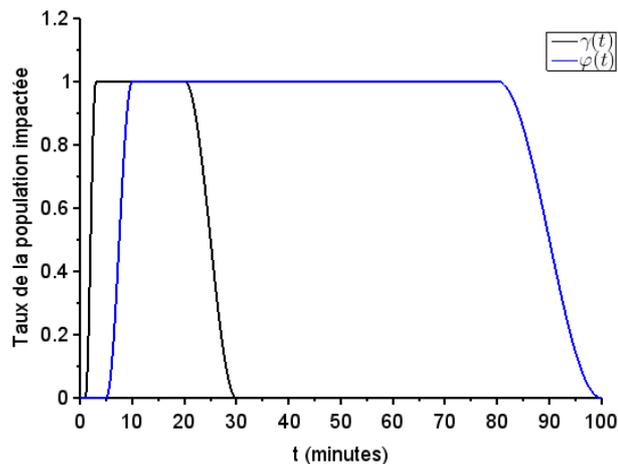
La conception d'un modèle nécessite de le tester pour des situations connues afin de légitimer l'exploration des réponses. Des simulations numériques ont ainsi été réalisées pour valider le modèle, tester différents scénarios, légitimer l'exploration des réponses.

Le risque de tsunami cosmique sur le littoral azuréen a été retenu comme scénario de menace. Le tsunami serait déclenché par la rupture de la faille ligurienne en mer, avec un temps d'arrivée de la première vague de l'ordre d'une quinzaine de minutes (Ioualalen *et al.*, 2014). La soudaineté de l'évènement permettrait difficilement aux acteurs institutionnels d'alerter et d'évacuer la population avant son arrivée, et ce, malgré la présence d'un centre d'alerte aux tsunamis en Méditerranée (Roudil *et al.*, 2013). Ce risque fait également l'objet de modèles de vulnérabilités territoriales et de localisations d'abris pour accompagner la décision publique (cf partie 3 du mémoire).

Pour le déclenchement de l'aléa (fonction $\gamma(t)$), nous supposons que la population commence à être informée de l'arrivée de la catastrophe au bout d'un temps assez bref (ici 1 minute), que le pic de population est atteint entre la troisième et la vingtième minute puis décroît. Le retour au comportement du quotidien (fonction $\varphi(t)$) n'est bien évidemment pas immédiat face à un tel évènement. Il commencera à se faire après cinq minutes, atteindra son maximum au bout de dix minutes et ce retour commencera à

diminuer à la quatre-vingtième minute (Fig. 25). Bien évidemment, la forme de ces courbes peut être modulée selon le type d'évènement (annoncé ou non, à cinétique rapide ou lente etc.).

Figure 25 - Les fonctions phi et gamma (Réalisation : N. Verdière et V. Lanza pour la recherche Com2SiCa, 2019)



L'une des solutions pour valider le modèle est d'effectuer une rétrovalidation, c'est-à-dire de comparer les résultats de simulation avec des observations ou des données (issues d'expérimentation ou de simulation). Il s'agit donc de retrouver les valeurs des paramètres permettant d'obtenir en données de sorties l'effectif de population adoptant un certain type de comportement.

De quelles données disposons-nous ? Les données quantitatives sur les comportements humains lors de catastrophes sont rares, se contredisent parfois et entachées d'incertitude. Cela est dû au fait i) qu'il n'est pas possible d'instrumenter en continu l'être humain dans l'attente d'un éventuel évènement catastrophique, ou dans l'espoir d'en éviter un, ii) qu'il est difficile de manipuler l'environnement (au sens de créer une perturbation) et d'analyser les réponses comportementales en fonction des perturbations provoquées artificiellement.

Il est toutefois possible de distinguer deux groupes de données, l'un fournissant des pourcentages de populations adoptant un certain type de comportement et l'autre des durées de comportement.

Les pourcentages de populations adoptant un certain type de comportement

Les différents types de comportements humains peuvent se manifester dans des proportions variables, en fonction des situations catastrophiques, de la soudaineté de la menace, de la composition du groupe dans des conditions d'urgence, des aptitudes individuelles à comprendre le danger, de la connaissance de l'environnement. La réponse est plus ou moins adaptée à la catastrophe, les comportements modifiant la vulnérabilité de la population ou au contraire sa résilience selon leur adaptation à la situation.

S. Boyd (1981) estime que dans la plupart des catastrophes : « 15% des individus manifestent des réactions pathologiques patentes, 15% conservent leur sang-froid et 70% manifesteraient un comportement apparemment calme mais répondant en fait à un certain degré de sidération émotionnelle et de perte de l'initiative qui relève du registre pathologique ». En revanche, un rapport de l'ingénierie de la sécurité incendie (ISI, 2012) fait état de 10 à 15% de personnes ayant des

comportements anormaux ou présentant des états confusionnels, de 12 à 25% réagissant correctement et de 75% de personnes pétrifiées, inhibées ou hébétées. Enfin, selon J.S. Tyhurst (1957), en situation exceptionnelle, 10 à 25% des individus présentent des comportements inadaptés, 12 à 25% réagissent de façon adaptée, et 75 % ont une réaction apparemment normale mais dans la réalité non réfléchie. Si les valeurs varient à la marge selon les sources bibliographiques, toutes révèlent la diversité des réactions avec une prépondérance des comportements réflexes. Il convient de préciser qu'à notre connaissance aucune donnée n'est disponible pour quantifier les mécanismes de transition d'un état de comportement à un autre.

Au regard de ces quelques rares données et des observations de situations réelles, nous avons opté pour des fourchettes de valeurs, à moduler bien évidemment selon que la catastrophe survient par surprise (par exemple attaque terroriste, inondation ou tsunami local) ou non avec :

- Comportements réflexes = 50 à 75 % de la population
- Comportements de panique = 12 à 25 % de la population
- Comportements raisonnés = 12 à 25 % de la population

La durée des comportements

Ces différentes réactions sont de durée variable (Vermeiren, 2007), avec :

- la durée du comportement réflexe varie de quelques minutes à 1 heure. Le plus souvent ce type de comportement ne dépasse pas 15 minutes. Mais il peut durer plus longtemps, notamment lorsqu'il correspond au délai d'évacuation d'une région sinistrée,
- la durée du comportement de panique varie de quelques minutes à 1 heure. Le plus souvent, ce type de comportement ne dépasse pas 15 minutes. La panique collective se résout généralement spontanément,
- la durée du comportement contrôlé varie de quelques minutes à plusieurs heures, selon la reprise des rôles et des missions par les acteurs institutionnels.

Sur la figure ci-après (Fig. 26), les valeurs choisies pour les paramètres permettent de retrouver les rares données de calibration existantes. L'intégrale des courbes, correspondant à l'aire entre la courbe et l'axe des abscisses, renseigne en effet sur le pourcentage global de l'effectif de la population correspondante. On voit facilement que le pourcentage global des comportements réflexes $r(t)$ est bien situé entre 50 et 75%, alors que le pourcentage global des comportements paniqués $p(t)$ ou contrôlés $c(t)$ est situé entre 12 et 25%. Plus précisément, à la figure 26, où la culture du risque a été scénarisée, on force les comportements de contrôle : on obtient 74,1% de population en comportements réflexes, 14,7% en comportements contrôlés et 11,11% en paniqués. A la figure 27, on force les comportements de panique (moins de culture du risque), on obtient : 62,5% de la population en comportements réflexes, 15% en comportements contrôlés et 22,5% en paniqués. Le modèle fournit en plus une information sur l'évolution de ces répartitions.

Figure 26 – La validation du modèle PCR, les valeurs des paramètres étant fixées à : $B_1 = 0.03$, $B_2 = 0.01$, $C_1 = 0.1$, $C_2 = 0.04$, $\alpha_1 = 0.06$, $\alpha_2 = 0.04$, $\delta_1 = 0.04$, $\delta_2 = 0.04$, $\mu_1 = 0.04$, $\mu_2 = 0.06$, $s_1 = s_2 = 0$ (Réalisation : N. Verdière pour la recherche Com2SiCa, 2019)

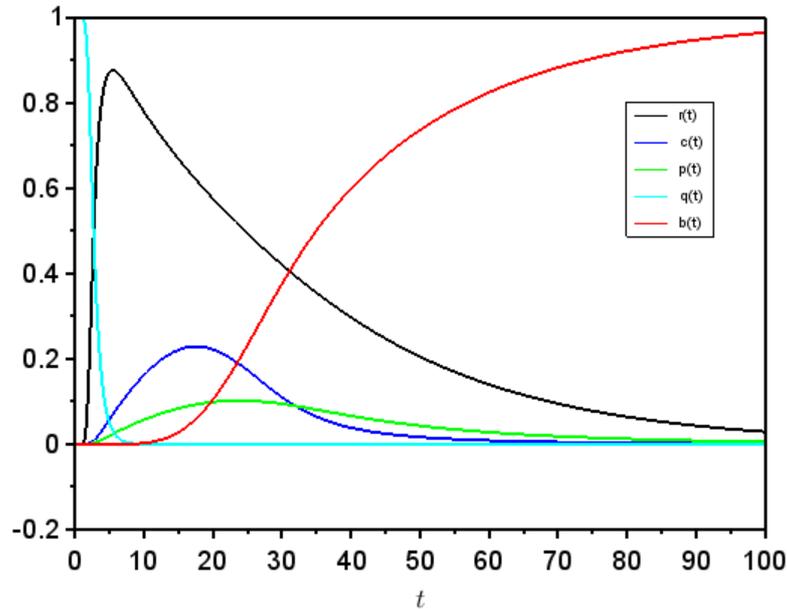
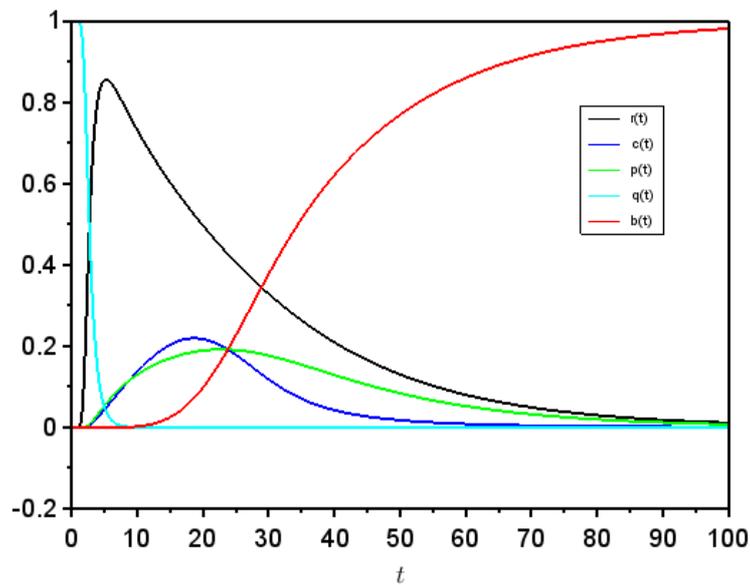


Figure 27 – La validation du modèle PCR, les valeurs des paramètres étant fixées à : $B_1 = 0.02$, $B_2 = 0.03$, $C_1 = 0.1$, $C_2 = 0.04$, $\alpha_1 = 0.04$, $\alpha_2 = 0.04$, $\delta_1 = 0.06$, $\delta_2 = 0.04$, $\mu_1 = 0.06$, $\mu_2 = 0.06$, $s_1 = s_2 = 0$ (Réalisation : N. Verdière pour la recherche Com2SiCa, 2019)



Conclusion

Ce modèle a permis de produire un système dynamique à la fois suffisamment expressif pour traduire la complexité du phénomène et également suffisamment synthétique pour que puissent se dégager des paramètres essentiels à la compréhension de l'évolution

comportementale.

L'une des limites de ce modèle est la non prise en compte du rôle de la dimension spatiale dans les dynamiques comportementales et les dynamiques de déplacements. Ce défi scientifique, nous souhaitons le relever dans les années à venir (cf. partie 4). La question posée sera désormais comment se diffusent les comportements dans un contexte spatial et d'évacuation d'urgence ? Cette prise en compte de l'espace ne constitue pas seulement une revendication d'ordre scientifique. Elle a des conséquences pratiques essentielles. Comme le notait P. Gould (1992) : « Grâce aux prévisions spatio-temporelles, en anticipant les cartes futures, on peut vraiment faire quelque chose pour combattre une épidémie mortelle {celle du sida} ». Cette remarque est valable pour tous les risques et certainement aussi pour les populations menacées par des risques multiples. Il s'agira de le démontrer.

Publications et communications majeures (par ordre chronologique, selon la codification utilisée dans la liste complète des publications fournie dans le volume 1)

Après avoir mené des recherches pluridisciplinaires sur les structures et dynamiques des risques et catastrophes extrêmes, sur la mise en valeur de leur complexité, je développe depuis quelques années des recherches interdisciplinaires sur les comportements humains lors de catastrophes soudaines et imprévues, d'origine naturelle, technologique ou sociétale, en investissant le domaine des attentats. Ces recherches sont valorisées dans le cadre de conférences scientifiques (nationales et internationales), et ont fait l'objet de publications dans des revues de renommée internationale de géographie et de mathématiques.

A.26 – 2016 – 2 - Provitolo D., Frankhauser P., Morer M., Eaux Ch., Ansel D., Agbossou I., Peeters D., Caruso G., (2016), « Collective and cooperative behaviour models », pp. 151-192, In : *Deciding Where to Live - an interdisciplinary approach to residential choice in its social context* (Eds Frankhauser P. et Ansel D., Springer Vs, Wiesbaden, 332 p. (résultat de l'ANR ECDESUP).

CI.27-2019-1- Lozi R., Provitolo D., Tric E., (2019), « Assessing the importance of town configuration on crowd evacuation dynamics in the course of terrorist attack, using a dynamical model », *Mendel 2019, 25th International Conference on Soft Computing*, July 10-12, Brno, Czech Republic.

CI.26-2018-5- Provitolo D. et Verdière N., (2018), « Une recherche transdisciplinaire pour comprendre les comportements humains lors de catastrophes : de l'observation à la modélisation mathématique », *Séminaire Potentiel, Trajectoire, Equilibre*, 15 fév. 2018, Paris.

CI.25-2018-4- Provitolo D. et Lozi R., (2018), « From observation to mathematical modeling of human behaviour in the face of disasters : an example of transdisciplinary research », *International Symposium on Computational Science and its Applications*, Feb 5-6, 2018, Sharda University, Greater Noida, India.

CI.24-2018-3- Lozi R. et **Provitolo D.**, (2018), « Topological analysis of a weighted panic control reflex model in the context of terrorist attack », *International Symposium on Computational Science and its Applications*, Feb 5-6, 2018, Sharda University, Greater Noida, India.

CI.17-2017-1- Provitolo D., (2017), « Observer et modéliser les comportements humains lors de catastrophes : un levier pour agir sur la résilience des populations », *Journée Risques sismiques et gravitaires au Liban*, Institut Français, Beyrouth, Liban, 29-30 mars 2017.

CI.10-2014-2- Provitolo D., (2014), « Café Géo sur les risques et catastrophes sous l'angle du chaos », *Géocinéma, Chaos : ordre et désordre*, UMR ADESS, Bordeaux, 25 au 27 mars 2014.

CI.9-2014-1- Provitolo D., Kociemba V., (2014), « Débat sur le film « Les bêtes du sud sauvage » de Benh Zeitlin. *Géocinéma, Chaos : ordre et désordre*, UMR ADESS, Bordeaux, 25 au 27 mars 2014.

- A.24 – 2015 – 6 -** Verdière N., Cantin G., **Provitolo D.**, Lanza V., Dubos-Paillard E., Charrier R., M. A. Aziz-Alaoui, Bertelle C., (2015), « Understanding and simulation of human behaviors in areas affected by disasters : from the observation to the conception of a mathematical model », *Global Journal of Human-Social Sciences*, Vol. 15, Issue 10.
- A.23 – 2015 – 5 -** **Provitolo D.**, Dubos-Paillard E., Verdière N., Lanza V., Charrier R., Bertelle C., Aziz-Alaoui M. A., (2015), « Les comportements humains en situation de catastrophe : de l'observation à la modélisation conceptuelle et mathématique », *Cybergéo*, URL : <http://cybergegeo.revues.org/27150>
- B.24-2015-1 -** **Provitolo D.**, (2015), « Les comportements humains face aux catastrophes : les comprendre pour mieux les prévenir », *Colloque ThéoQuant 2015*, Besançon, 20-22 mai 2015.
- CI.4-2010-1-** **Provitolo D.**, (2010), « Les concepts, méthodes et théories de la complexité peuvent-ils être utiles à la compréhension des risques et catastrophes ? Le point de vue d'une géographe », *Séminaire RTP Gestion des risques et complexité*, Organisé par P. Pigeon, Bourget-du-Lac, Oct. 2010.
- A.13 – 2009 – 3 –** Daudé E., **Provitolo D.**, Dubos-Paillard E., Gaillard Ch., Eliot E., Langlois P., Propeck-Zimmermann E. et Saint-Gérard T., (2009), « Spatial risks and complex systems », *From System Complexity to Emergent Properties*, Springer, Series Understanding complex systems, pp. 165-178.
- A.12 – 2009 – 2 -** **Provitolo D.**, (2009), « A new classification of catastrophes based on "Complexity Criteria" », *From System Complexity to Emergent properties*, Springer, Series Understanding complex systems, pp. 179-194.
- A.11 – 2009 – 1 -** **Provitolo D.**, (2009), « Structural and dynamical complexities of risk and catastrophe systems : an approach by System Dynamics Modelling », *Complex systems and self-organization modelling*, Springer, Series Understanding complex systems, pp. 129-138.
- B.11-2007-3 -** Daudé E., **Provitolo D.**, Dubos-Paillard E., Gaillard D., Eliot E., Langlois P., Propeck-Zimmermann E., and Saint-Gérard Th., (2007), « Industrial risks and complex systems », Actes du colloque international *European Conference Complex Systems –EPNACS'07, Emergent Properties in Natural and Artificial Complex Systems*, pp. 81–92.
- B.8-2006-1-** **Provitolo D.**, (2006), « Structural and dynamic complexities of risk and catastrophe systems : an approach by system dynamics modelling », Actes du colloque international *The European Simulation and Modelling conference 2006*, octobre 2006, Toulouse, pp. 430–434.

PARTIE 3

DES MODELES DE VULNERABILITE ET RESILIENCE POUR ACCOMPAGNER LA DECISION PUBLIQUE

Introduction - Des modèles décisionnels

Si les scientifiques cherchent à comprendre les catastrophes, la demande sociale et politique vise en revanche à prendre des décisions. Pour cela, elle préfère s'appuyer sur des modèles décisionnels. Ils peuvent être de trois types :

- des modèles cartographiques : ils permettent de spatialiser l'information et de prendre en compte l'espace grâce aux Systèmes d'Information Géographique. Ils sont lisibles par les élus et voulus par les Ministères. Les modèles cartographiques sont ainsi intégrés aux outils réglementaires de prévention des risques. Une fois territorialisé, le risque devient en effet objet de management, c'est-à-dire d'une action publique de gestion ou de projet (Lamarre, 2002),
- des modèles de localisation optimale : ils permettent, comme leur nom l'indique, d'identifier quelle serait la localisation optimale d'un nouvel élément sur un territoire. Le modèle de Reilly est par exemple utilisé pour la localisation de services utiles à la population (comme un commerce de proximité), et le modèle de Weber a longtemps occupé une place importante en économie spatiale pour la localisation idéale d'un établissement industriel. Les Systèmes d'Information Géographique permettent de « simuler » les localisations optimales du point de vue des critères retenus (par exemple accessibilité, capacité d'accueil), de réaliser des scénarios et de fournir un modèle cartographique,
- des modèles mathématiques d'optimisation : ils permettent de minimiser ou maximiser une fonction. Ils sont fréquemment utilisés en économie pour optimiser un prix de vente, un rendement d'appareil, un trajet, etc.

Je m'intéresse plus spécifiquement aux modèles décisionnels i) de type cartographique pour évaluer et spatialiser les vulnérabilités territoriales du littoral azuréen face aux menaces naturelles et ii) de localisation optimale pour proposer des sites refuges pour une auto-évacuation spontanée de la population en cas de tsunami. En sus de ces modélisations, je mène des actions plus opérationnelles pour améliorer la résilience des populations.

Ces recherches sont menées au sein de l'équipe Aléas et Vulnérabilités puis RISQUES dont j'ai la responsabilité au laboratoire Géoazur. J'ai en effet développé depuis plusieurs années une recherche collaborative intégrant les dimensions des menaces naturelles et des territoires exposés et vulnérables à ces menaces. Ces travaux associent géographes, géologues, géophysiciens et décideurs publics (notamment la Préfecture des Alpes-Maritimes, la Direction Départementale des Territoires et de la Mer 06, le Service Départemental d'Incendie et de Secours des Alpes-Maritimes, la Direction de la Prévention des Risques de la métropole Nice Côte d'Azur, le SMIAGE –ex Syndicat Intercommunal de la Siagne-, l'Etablissement Public d'Aménagement Plaine du Var). Ces collaborations permettent de cartographier les vulnérabilités des territoires littoraux exposés à différents types de menaces naturelles, menaces ayant pour traits communs la soudaineté, l'imprévisibilité et les dynamiques rapides.

Elles s'effectuent dans le cadre de différents projets financés (ASTARTE²⁰, PORTE²¹, RITMICA²², Aléazur). Elles ont été réalisées grâce à l'intérêt et la motivation d'étudiants avec qui j'ai eu la satisfaction de travailler, voire de former en Master 2 (dans le cadre du module Risques et Aménagement du Territoire du Master 3G –Géophysique-Géologie-Géotechnique). Ces expériences d'encadrement et de coencadrement de master et de doctorat ont été très différentes les unes de autres, de par le contexte, les personnalités de chacun et la diversité de leur formation (en sciences de la terre et de l'univers ou en sciences géographiques). J'y ai beaucoup appris et développé le goût d'une forme particulière d'échange (de savoir et de conviction) et de partage (le côté inconnu de la recherche). A leur façon, ils ont contribué aux productions et à la dynamique de l'équipe RISQUES.

J'ai ainsi encadré ou coencadré (dans un cadre associant géosciences – géographie – acteurs institutionnels) dès 2009 à Géoazur plusieurs étudiants en thèse ou en stage de Master 2, de Master 1 ou de Licence 3 sur les vulnérabilités et résiliences des populations et des territoires face aux glissements de terrain, aux inondations méditerranéennes, et aux tsunamis locaux sur le littoral azuréen. Je présente ici les résultats obtenus pour des risques ou catastrophes déclenchés par des excès d'eau.

²⁰ *Projet européen Astarte – Seventh Framework Programme (2007-2013) - Assessment, Strategy And Risk Reduction for Tsunamis in Europe - Partenaire du workpackage Building Resilient Societies (PI F. Lavigne, Laboratoire de Géographie Physique).*

²¹ PORTE – Plate-forme d'observation et de suivi des risques naturels en région PACA afin de renforcer la résilience des territoires (Contrat de Plan Etat Région 2014-2020) (co-pilotage avec E. Tric, Géoazur)

²² RITMICA - Risques Telluriques Multiples, Intégrés, sur la Côte d'Azur est un projet financé par UCA^{JEDI} de 2017-2020 (AAP Risques en zone nord méditerranéenne). Dans ce projet, nous pilotons avec E. Garbolino (Ecole des Mines – Centre de Recherche sur les Crises) le workpackage *Vulnérabilités et Résiliences des territoires méditerranéens face aux risques naturels et anthropiques*. Ce projet vise à rassembler et structurer de façon pérenne la communauté des risques telluriques et induits sur le littoral azuréen au sein du périmètre de l'Université Côte d'Azur.

Chapitre 7

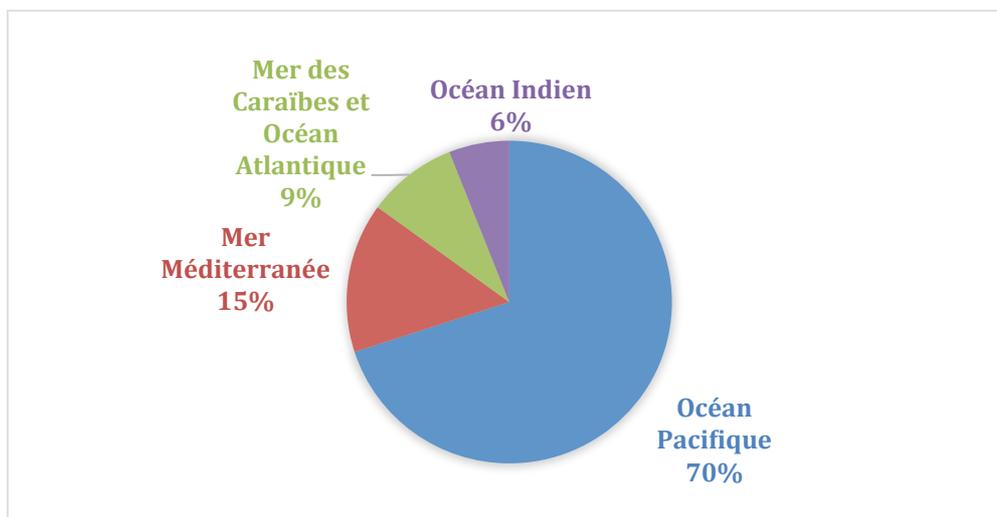
Se préparer au risque de tsunami d'origine sismique en Méditerranée : une demande de la commission océanographique internationale de l'UNESCO et du Sénat

Du fait d'une forte pression anthropique, d'un système hydrographique très actif, d'un gradient de relief propice à des phénomènes extrêmes, notamment climatiques, et à la combinaison d'aléas telluriques émanant à la fois des domaines terrestres et marins (sismique, tsunami et gravitaire), le littoral azuréen est, en France métropolitaine, l'un des plus exposés à une diversité de menaces. Il est également l'un des plus vulnérables du fait de ces menaces qui surviennent le plus souvent de façon soudaine, imprévue et sans signe précurseur. Cela est particulièrement vrai en contexte de tsunami cosismique local.

Le choix d'étudier le risque de tsunami sur le littoral méditerranéen français n'est pas anodin :

- Dans un contexte global d'augmentation des aléas, et surtout de l'augmentation des enjeux, la Commission Océanographique Internationale (COI) des Nations Unies, appelle à se préparer aux tsunamis en Méditerranée (Projet Neamtic, 2013, <http://neamtic.ioc-unesco.org/>). En effet, si la plus grande majorité des événements se produisent dans l'Océan Pacifique, la mer Méditerranée est le second bassin où l'on retrouve le plus d'événements, avec 15 % des événements mondiaux répertoriés (Fig. 28).

Figure 28 – La localisation des événements tsunamiques de 1610 à 2016 (Source : L. Boschetti *et al.*, 2019)



- Sur ce littoral méditerranéen, croissance urbaine, saturation des littoraux, constructions en zones dangereuses, dynamiques d'aléas et de vulnérabilités sont imbriquées.
- Le bassin liguro-provençal dont fait partie le littoral azuréen est une des zones les plus sismiques d'Europe occidentale (Fig. 29), comprenant la faille Ligure, également appelée LFS (*Ligurian Fault System*). En fait, il ne s'agit pas d'une seule

faille continue, mais plutôt d'un réseau de failles actives de 80 km de long (Fig. 30). Cette figure représente la localisation de la faille Ligure, ainsi que la bathymétrie de la zone. Elle s'étend le long de la Riviera franco-italienne, posant ainsi la question de l'exposition de ces territoires, fortement anthropisés et aux fortes densités de population, aux aléas sismiques et tsunamiques. Ce réseau de failles est encore actif aujourd'hui, des séismes y sont enregistrés, comme par exemple celui du 25 février 2001 d'une magnitude de 4,5. Ce système de failles Ligure, qui s'étend du littoral azuréen (France) au littoral ligure (Italie), pose donc la question des vulnérabilités et résiliences de ce territoire aux tremblements de terre et tsunamis associés.

- Ces tsunamis sont générés par des séismes proches dus à des ruptures de la faille Ligure, avec un temps d'arrivée de la première vague de l'ordre d'une quinzaine de minutes (Ioualalen *et al.*, 2014). Ces tsunamis locaux peuvent être localement aussi destructeurs que les télétsunamis. Ils sont produits certes par des séismes de moindre magnitude, mais leur soudaineté permet difficilement aux acteurs institutionnels d'alerter et d'évacuer la population avant l'évènement.

Figure 29 – La sismicité en zone Ligure durant la période 1980-2010

Catalogue du Bureau Central Sismologique Français (<http://www.franceseisme.fr/>) tiré de Larroque *et al.* (2012). Compilation de diverses sources : Institut Géographique National (IGN), le Shuttle Radar Topography Mission (SRTM, NASA), et l'Institut Français de Recherche et d'Exploration de la Mer (IFREMER). Les magnitudes de ces séismes sont comprises entre 2 et 4.7. Les étoiles de couleur correspondent approximativement aux épicentres du séisme du 20 juillet 1564 (étoile bleue) et du 19 juillet 1963 (étoile marron). Les carrés de couleur correspondent aux précédents emplacements de l'épicentre du séisme de 1887 (avant Larroque *et al.* 2012).

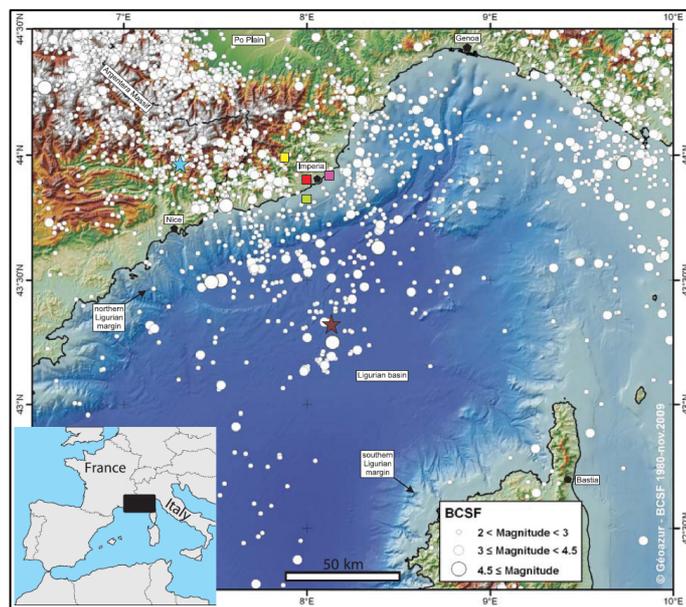
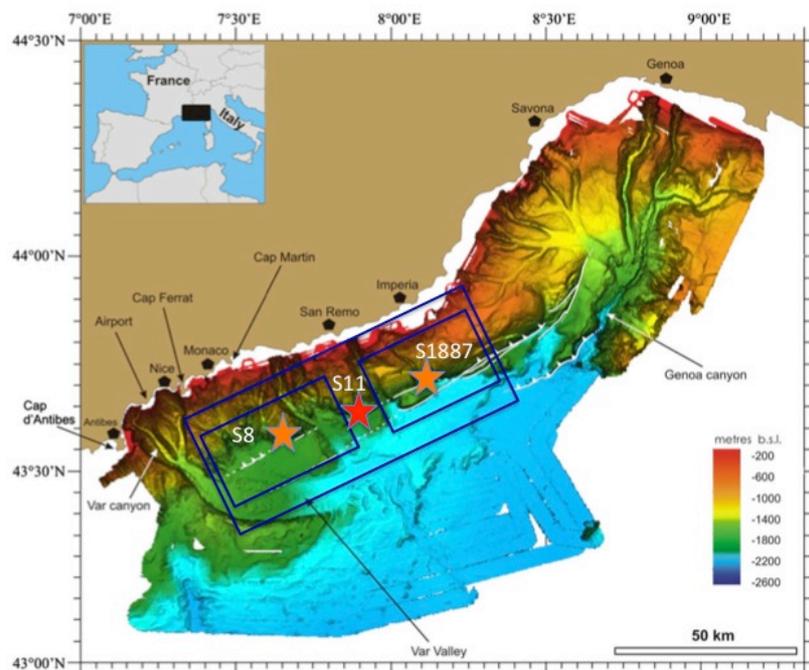


Figure 30 – La localisation du réseau de failles Ligure (en blanc) dans le bassin, la bathymétrie de la zone (campagnes océanographiques MALISAR) ainsi que le positionnement du plan du réseau de failles et des épacentres des différents scénarios utilisés (S1887, S8 et S11) – (Source : Boschetti L. *et al.*, 2019, d'après C. Larroque, B. Mercier De Lépinay et S. Migeon, 2010)



7.1. Des modèles décisionnels cartographiques

Pour cette recherche à portée sociétale et territoriale, j'ai retenu avec les acteurs opérationnels et les étudiants le scénario du tsunami historique et emblématique de 1887 pour mener une analyse intégrée (multialéas, enjeux, vulnérabilités) de ce risque de catastrophe sur le littoral des Alpes-Maritimes.

Ce choix est lié au fait qu'il n'existe pas à l'heure actuelle de zonage officiel de la submersion marine par tsunami en France métropolitaine méditerranéenne. Pourtant la Commission Océanographique Internationale (2008) appelle à se préparer au risque de tsunami en Méditerranée depuis plusieurs années et le Sénat vient de publier en mars 2019 un rapport intitulé « La prévention et l'alerte du risque de tsunami sur les côtes françaises ».

Le séisme du 23 février 1887 sert de référence à cette étude de l'aléa tsunami, car il est l'évènement emblématique de la zone ligure. Ainsi, à partir des résultats de simulation de tsunami publiés par Ioualalen *et al.* (2014), ont été réalisés les éléments suivants (dans le cadre de différents projets et des encadrements et co-encadrements d'étudiants L. Boschetti et M. Bantegnie lors de leur stage de master 2 à Géoazur ; stage suivi par l'obtention d'un financement de thèse de la région PACA pour L. Boschetti (codirection avec E. Tric) :

- une cartographie par Système d'Information Géographique des zones inondées pour différents scénarios de tsunami sur le littoral azuréen,

- un diagnostic des enjeux majeurs du territoire (population, établissements de santé, casernes de pompiers, administration et établissements d'enseignement etc.),
- une analyse spatiale des vulnérabilités au regard de différents scénarios d'aléas afin d'identifier et proposer plusieurs sites de refuges potentiels pour la population.

Avec la présence de deux aléas distincts pouvant impacter le territoire azuréen, au-delà de l'intensité de l'aléa en général et du niveau de vulnérabilité, il faut savoir à quel niveau se situent, de façon indépendante, l'aléa sismique et l'aléa tsunamigène. Au regard du nouveau zonage sismique de la France, le département des Alpes-Maritimes présente une sismicité moyenne (niveau quatre sur une échelle maximale de niveau cinq). Le risque de tsunami, quant à lui, est un aléa de faible probabilité et d'ampleur limitée : l'histoire des événements passés montre que les vagues ne dépassent pas les trois mètres cinquante (Larroque, 2009). Nous pouvons donc considérer cet aléa de faible ampleur au regard d'autres tsunamis, et notamment ceux de 2004 en Indonésie et 2011 au Japon, dont les vagues ont dépassé les quinze mètres. La vulnérabilité des populations (sous l'angle de leur exposition), quant à elle, peut potentiellement être qualifiée de modérée à forte, du fait de l'importante urbanisation de la région, de la concentration des enjeux majeurs sur le littoral et des fortes densités de population (Figs. 31 et 32).

Figure 31 - L'identification et la spatialisation des enjeux territoriaux (Source : A. Sanchez, encadrement D. Provitolo, 2010)

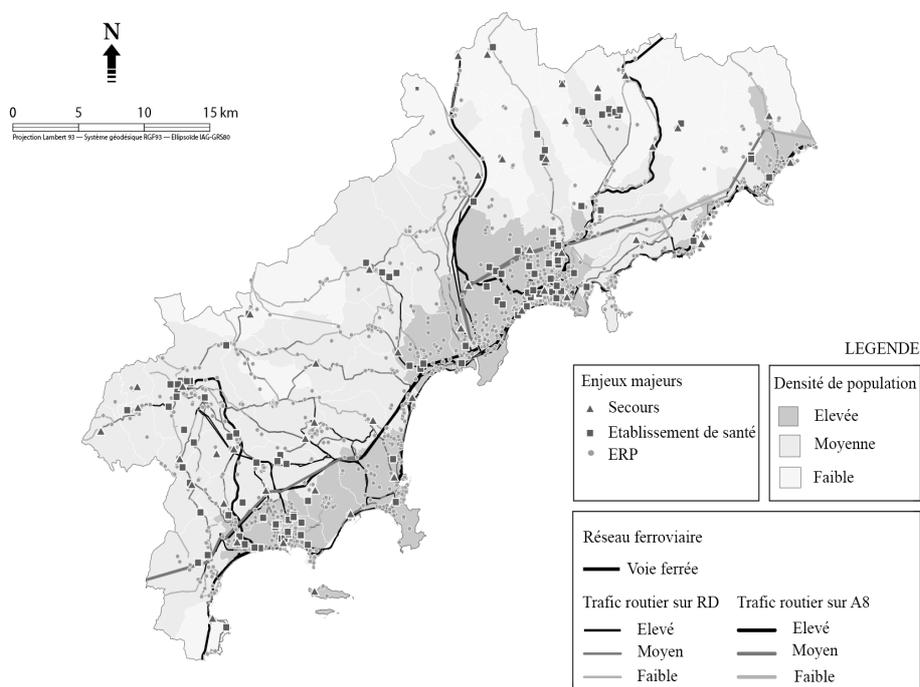
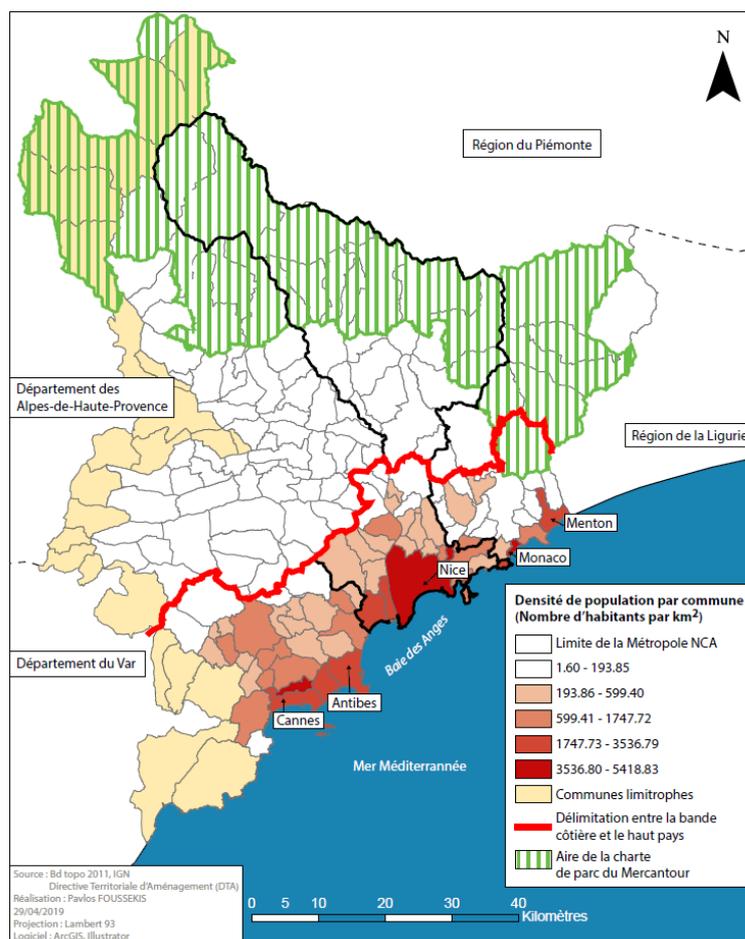
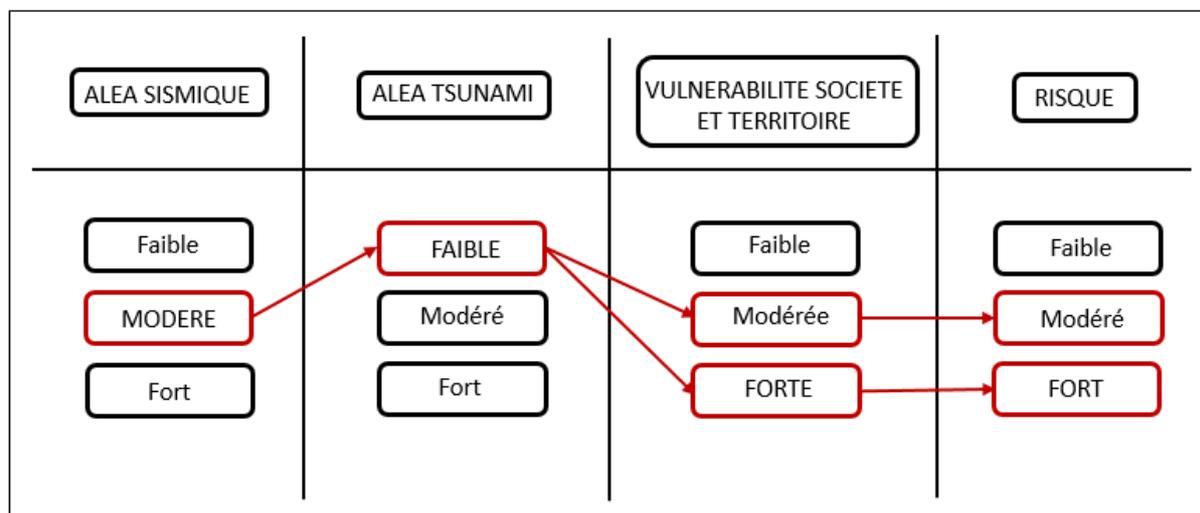


Figure 32 - La répartition de la population dans les Alpes-Maritimes (Source : P. Foussekis, encadrement D. Provitolo, 2019)



Au regard de ces différents éléments, le niveau de risque est estimé modéré à fort (Fig. 33).

Figure 33 – La caractérisation d'un risque en fonction d'un aléa et d'une vulnérabilité (Source : M. Bantegnie, 2015, encadrement D. Provitolo)



7.1.1. Quels scénarios de tsunami retenir ?

A partir des modélisations et simulations effectuées par nos collègues de Géoazur pour ce risque de tsunami d'origine sismique, L. Boschetti a réalisé dans le cadre de son master 2 (encadrement D. Provitolo, tutrice E. Beck) une cartographie des zones inondées sur le littoral azuréen (Fig. 34). Cette cartographie a été réalisée suivant trois hypothèses de rupture de faille choisies en concertation entre géophysiciens et géographes de l'UMR Géoazur, au regard de particularités liées à la menace et de cadres politiques.

- L'hypothèse S1887 correspond à l'évènement historique du séisme ligure du 23 février 1887, dont la magnitude a été estimée à 6.91 (Ioualalen *et al.*, 2014). La rupture est localisée sur la partie est de la faille ligure. Dans ce cas précis, cette rupture s'étendrait sur trente-cinq km (l'ensemble de la faille ligure ayant quatre-vingts km de longueur).
- Un scénario similaire de par les paramètres utilisés, mais différent quant à la localisation de la rupture sur la faille, a été simulé ; il s'agit du scénario S8 correspondant en tout point au scénario S1887 au niveau des caractéristiques sismiques, à l'exception de son positionnement sur la faille. En effet, le premier, qui correspond au séisme de 1887, se situe sur la partie est de la faille, en Italie, au large d'Impéria, alors que le scénario S8 est localisé sur la partie ouest de la faille, chevauchant les deux bords de la frontière franco-italienne, plus proche de la partie française et donc du littoral azuréen, littoral densément peuplé, fortement urbanisé et présentant de nombreux enjeux. Dans cette simulation, le centroïde, a été déplacé vers l'ouest, donc vers les côtes françaises, et correspond à la zone n'ayant pas rompu lors de l'évènement de 1887. Dans cette hypothèse, la magnitude a été estimée à 6.91 (Ioualalen *et al.*, 2014).
- Conformément aux demandes politiques visant à se préparer aux catastrophes majeures, une hypothèse extrême (S11) a été envisagée, avec une rupture de l'ensemble de la faille, c'est-à-dire une rupture de 80 km déclenchée par un séisme dont la magnitude a été estimée à 7.51 (Ioualalen *et al.*, 2014). Cette hypothèse de recherche répond à une injonction de l'UNESCO qui appelle à se préparer aux évènements extrêmes, ainsi qu'à une politique française lancée par l'ancienne Ministre de l'écologie, Ségolène Royale.

S'il s'avère que, de manière générale, les zones inondées sur le littoral azuréen sont relativement semblables, bien que le scénario extrême (S11) s'étende d'avantage à l'intérieur de la bande littorale (Boschetti, 2013 ; Boschetti, Provitolo, Tric, 2017), des différences notables se situent au niveau de la ville de Nice, plus particulièrement aux extrémités est et ouest (Fig. 34). A l'est, la ville de Nice pourrait être fortement impactée en cas de scénario extrême (Fig. 35).

Figure 34 – L'inondation par submersion marine sur la commune de Nice : scénarios du tsunami modéré (S8) et du tsunami extrême (S11) (Source : L. Boschetti, D. Provitolo, E. Tric, 2017, d'après Ioualalen *et al.*, 2014)

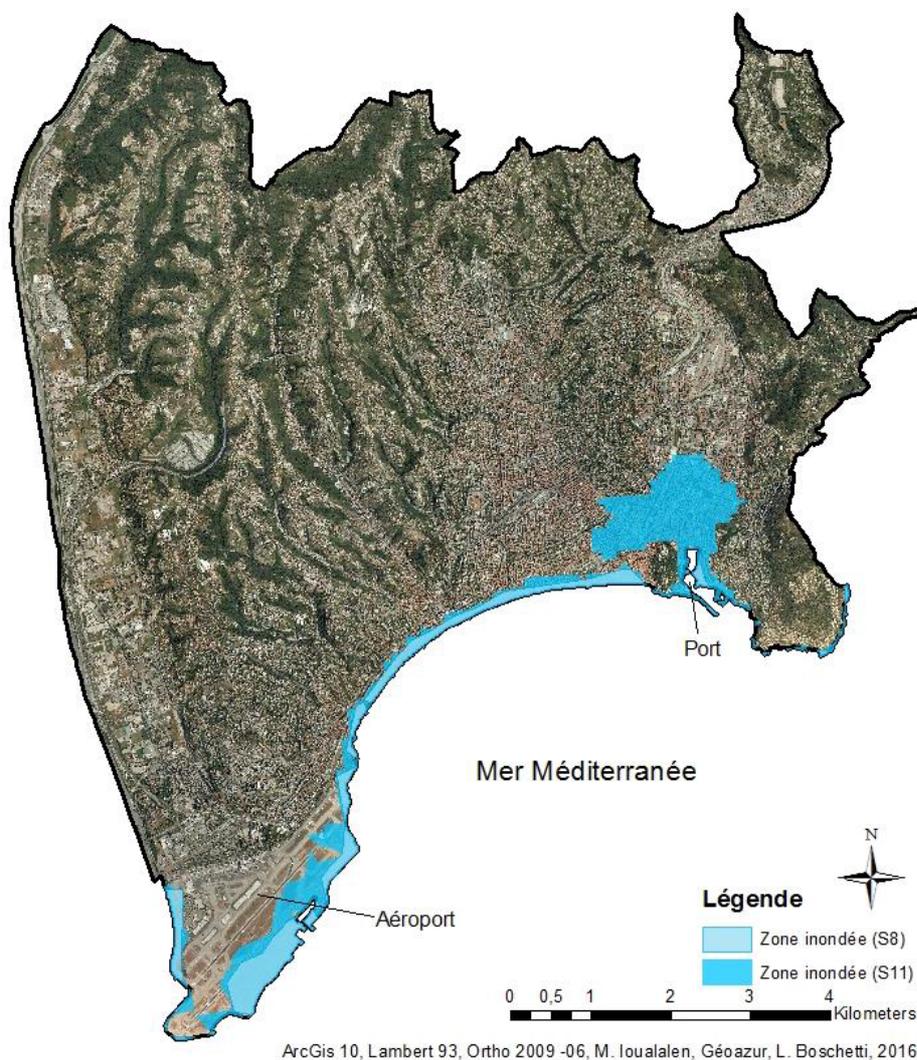


Figure 35 – La transposition des résultats sous Google Earth : l'est de Nice sous les eaux en cas de scénario de tsunami extrême (Réalisation : D. Provitolo, 2017, d'après Ioualalen *et al.*, 2014)



7.1.2. Des modèles cartographiques de vulnérabilités territoriales du littoral azuréen

A l'heure actuelle, il n'existe en France métropolitaine aucune cartographie réglementaire du risque de tsunami. Quelques cartographies informatives ont été réalisées, mais pour un enjeu territorial généralement unique (le bâti) et sur des communes spécifiques, généralement celle d'Antibes qui avait été impactée lors du tsunami d'origine gravitaire de 1979 (Sahal, 2011 ; Lambert, 2013). Les acteurs institutionnels ne disposent donc pas de cartographie sur l'ensemble du littoral azuréen.

Photo 4 - Un tsunami d'origine gravitaire sur le littoral azuréen (Source : Nice-Matin, 27 juillet 2013)



Pour remédier à cette lacune, j'ai encadré depuis plusieurs années des étudiants en Master 1 et 2. Ces derniers proposent des modèles cartographiques d'aide à la décision aux services opérationnels de gestion de crise. Des modèles cartographiques de la vulnérabilité de chaque enjeu territorial et du risque de tsunami sur les communes du littoral azuréen ont été réalisés et transmis au SDIS 06. Les résultats sont présentés sous forme d'atlas.

La méthodologie mise en place a consisté à identifier les enjeux territoriaux (population, établissements de santé, casernes de pompiers, administration et établissements d'enseignement, réseaux vitaux) et à leur associer des indicateurs de vulnérabilité (par exemple densité de population, connexité des réseaux, qualité de l'information, temps d'intervention des secours) (Tab. 2).

Tableau 2 - La détermination des indicateurs de vulnérabilité de l'enjeu Sécurité civile (Source : L. Boschetti, 2013 ; L. Boschetti, D. Provitolo, E. Tric, 2017)

| Enjeux | Facteurs | Unités de mesure | Sources |
|-----------------|---|----------------------------|-----------------------|
| Sécurité civile | Localisation des casernes | Coordonnées | BD-Topo V2.1 IGN 2011 |
| | Moyens humains | Nombre d'hommes | Non disponible |
| | Moyens techniques | Véhicules (nombre et type) | Non disponible |
| | Densité: par commune, zone inondée, non inondée | Caserne/km ² | Calcul |
| | Délai d'intervention des secours | Temps | SDIS o6 (SDACR) |

Afin de cartographier la vulnérabilité des territoires, une approche indiciaire permettant de définir des classes semi-quantitatives de niveau de vulnérabilité du territoire a été réalisée (Tab. 3). Pour chaque enjeu, il a été défini avec les acteurs de la sécurité civile et de la prévention des risques les critères de vulnérabilités et leurs unités de mesure. Les valeurs ont ensuite été classées en trois catégories selon leur vulnérabilité et ont trois indices de vulnérabilité : faible (1), moyenne (2), forte (3). Ce système permet de combiner les différents enjeux, une unité commune ayant été créée pour ces derniers.

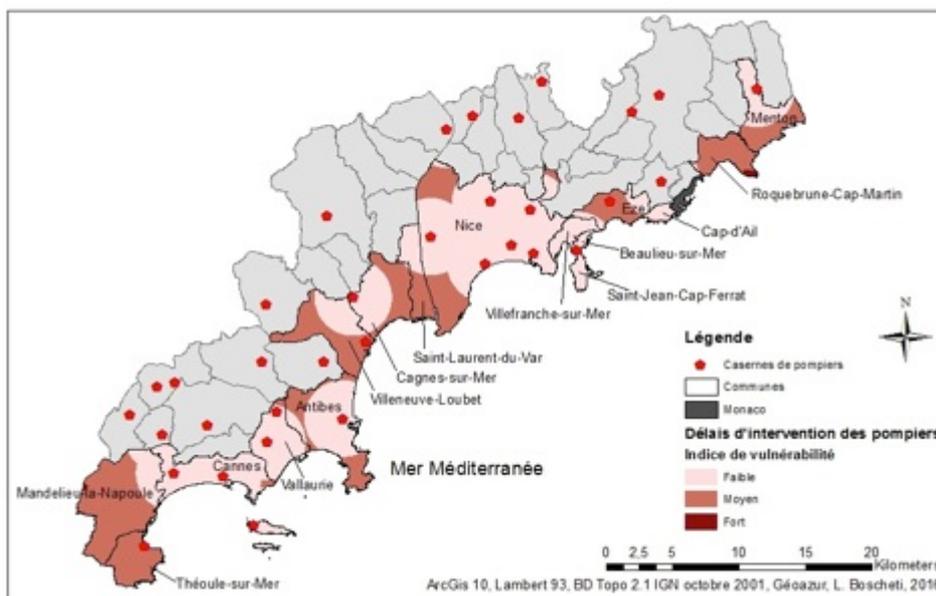
Tableau 3 - L'évaluation des niveaux de vulnérabilité (Source : L. Boschetti, encadrement D. Provitolo, 2013)

| Qualification de la variable | Facteurs | Faible | Moyen | Fort |
|------------------------------|------------------------------------|---|---|--|
| Va | Centres hospitaliers | Hors zones inondées | A proximité de la zone inondée | En zones inondées |
| Vb | Délais d'intervention des pompiers | 10 | 15 | 20 |
| Vc | Centres décisionnels | Hors zones inondées | A proximité de la zone inondée | En zones inondées |
| Vd | Densité de population | <500 | [500 ; 2000] | >2000 |
| Ve | Densité des ERP | [0 ; 1,07[| [1,07 ; 5,48[| [5,48 ; 16,98] |
| Vf | Orientation des routes | Routes perpendiculaires au littoral (S-N) | Routes intermédiaires | Routes parallèles au littoral (E-O) |
| Vg | Autres moyens de transport | Ports de plaisance | Aéroport d'affaire, Port intermédiaire | Aéroport international, Ports accueillant les bateaux de croisières à quai |
| Vh | Réseaux vitaux | Hors zones inondées | A proximité de la zone inondée | En zones inondées |
| Vi | Bordures littorales | Hors plages et promenades de bord de mer | Plages et promenades en dehors des zones inondées | Plages et promenades en zones inondées |

Je présente ici uniquement les résultats cartographiques pour l'enjeu « Centre d'Incendie et de Secours » (CIS) (Fig. 36). Il s'agit là d'un enjeu majeur de la gestion de crise, le CIS concourant à assurer la protection des populations et la lutte contre les catastrophes. Avec L. Boschetti, nous nous sommes intéressées non pas directement à la vulnérabilité de ces CIS, mais à la vulnérabilité du territoire et des populations (sous l'angle de leur évacuation) face au temps d'intervention de ces derniers.

Cette cartographie révèle des différences notables tant à l'échelle du littoral (avec une forte vulnérabilité aux extrémités est et ouest) qu'aux échelles intra-communales, avec là encore de fortes vulnérabilités sur des espaces difficilement accessibles (par exemple le cap d'Antibes sur la commune éponyme) ou aux frontières intercommunales (Nice/Saint-Laurent-du-Var). Elle est ainsi un outil d'aide à la décision des pouvoirs publics pour penser la localisation optimale de nouveaux équipements, les CIS, et assurer la sécurité des populations dans des zones peu desservies ou difficilement accessibles en cas d'évacuation.

Figure 36 - La cartographie de la vulnérabilité territoriale liée aux délais d'intervention des services de secours sur le littoral azuréen (Source : L. Boschetti, encadrement D. Provitolo, 2013)



7.2. Localiser de façon optimale des sites refuges dans le cas d'une auto-évacuation des populations

Nous venons de voir l'hétérogénéité de la couverture du territoire par les CIS. A cela s'ajoute le fait que la population dispose de moins de quinze minutes pour évacuer le bord de mer de Nice en cas de tsunami local. Un laps de temps bien trop court pour que les acteurs institutionnels aient le temps de planifier l'évacuation de la population sur le littoral azuréen. Il faudra donc que les populations adaptent leurs comportements à cette situation inattendue et évacuent spontanément. La question étant vers quels abris ? A l'heure actuelle, les sites refuges sont uniquement identifiés dans les outils de gestion de catastrophe, dans le cas d'une planification anticipée de l'évacuation quelque soit la catastrophe.

Partenaire du projet européen ASTARTE²³ et du workpackage sur la résilience dirigé par F. Lavigne (Laboratoire de Géographie Physique), j'ai encadré Maud Bantegine, étudiante de Master 2, pour développer une méthodologie permettant de déterminer et de localiser de façon optimale différents lieux de refuges potentiels en cas de submersion marine par tsunami. Comme indiqué dans la première partie de ce mémoire, les sites refuges permettent de faire face à la menace et sont un élément de résilience durant la catastrophe. Un site refuge peut être défini comme « un espace de mise en sécurité des personnes assimilable à une zone de regroupement. Il doit pouvoir accueillir plusieurs personnes pour un temps indéterminé » (Leone *et al.*, 2013). Pour l'étude, la définition suivante a été proposée : un site accessible sans mettre en danger la vie des habitants et sinistrés, permettant de recevoir un nombre important de personnes et de les garder en sécurité pendant plusieurs heures (les temps de la catastrophe et de l'arrivée des secours). La méthodologie mise en place s'appuie sur les travaux de nos prédécesseurs, notamment A. Budiarjo (2006), R.S. Dewi (2010), A. Sahal (2011), T. Carrasco et B. Cireau (2014) afin d'identifier les critères pertinents à l'analyse des abris.

7.2.1. Les critères de localisation

La soudaineté de la menace associée à la difficulté de réaliser une évacuation planifiée par les autorités publiques de la population avant la survenue du tsunami, a amené à s'interroger sur la localisation optimale des lieux de refuges potentiels pour une évacuation spontanée des populations. Ces derniers peuvent-ils être situés en zone inondée ? Dans l'affirmative, quelles doivent être leurs caractéristiques ?

Le partenariat avec les acteurs opérationnels a mis en lumière la nécessité d'identifier des sites refuges temporaires en zone inondée afin de faciliter l'auto-évacuation de la population et de permettre à cette dernière une mise en sécurité rapide (en quelques minutes à pied). Ces sites, qui pourraient paraître contre-opérationnels car au sein de la zone de danger, devraient participer à améliorer la résilience des populations durant la phase de catastrophe, car ce sont les lieux vers lesquels il est possible de se diriger rapidement dans le cas d'une évacuation spontanée (Provitolo *et al.* 2015). L'évacuation est d'abord horizontale, car les évacués doivent privilégier dans un premier temps leur mise en sécurité en dehors de la zone de danger (les plages et bord de mer), puis verticale car il s'agit de monter dans les étages des bâtiments.

Il ne s'agit pas ici de présenter dans le détail la méthodologie retenue pour identifier les sites et évaluer leur qualité. En revanche, il convient de préciser que dans cette étude, en accord avec les services de secours :

- seuls les Etablissement Recevant du Public (ERP) peuvent devenir un site refuge, à savoir les hôtels, magasins, maisons de retraite, hôpitaux, écoles, stades, restaurants,
- la disponibilité d'un site a été évaluée pour différents scénarios temporels codés comme suit : SC1a : pleine journée en période d'affluence; SC1b : pleine journée en période creuse; SC2a : pleine nuit en période d'affluence et SC2b : pleine nuit en période creuse.

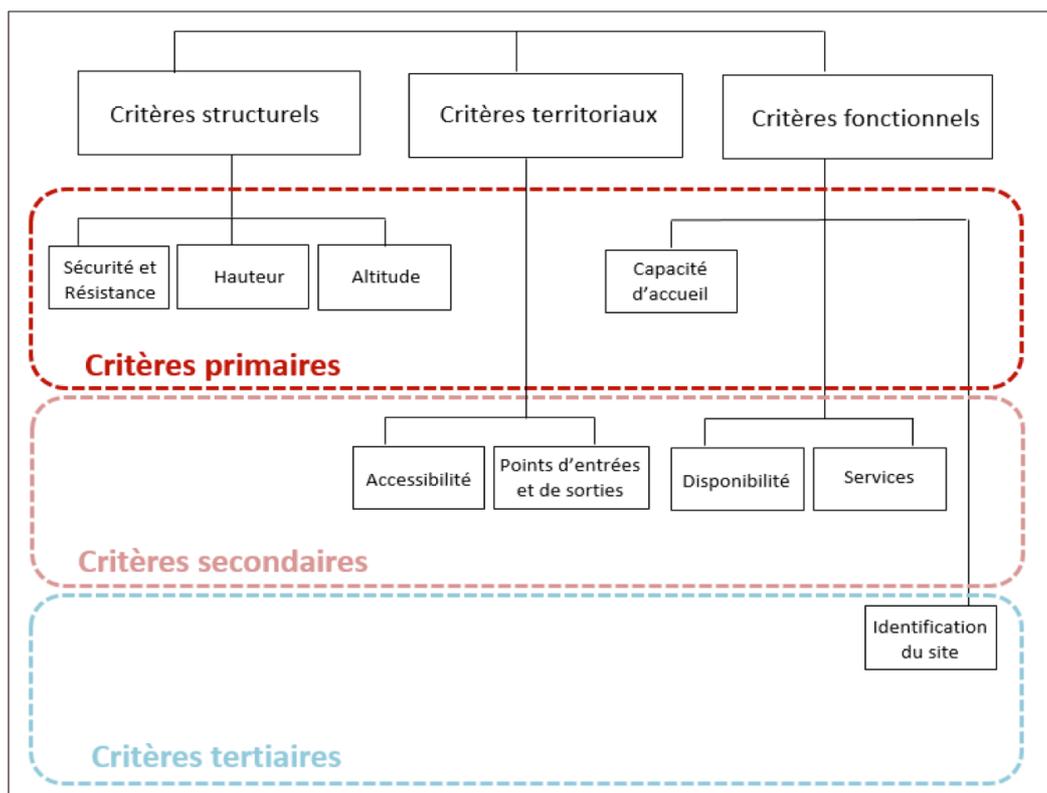
²³ *Projet européen ASTARTE – Seventh Framework Programme (2007-2013) - Assessment, Strategy And Risk Reduction for Tsunamis in Europe - Partenaire du workpackage Building Resilient Societies (PI F. Lavigne, Laboratoire de Géographie Physique).*

Pour identifier la localisation optimale des abris, plusieurs critères ont été retenus :

- les lieux de refuges devaient simultanément répondre à un ensemble de critères dits structurels, territoriaux et fonctionnels. Ces critères ont été organisés selon leur niveau d'importance. Ont été distingués des niveaux primaires, secondaires ou tertiaires (Fig. 37). Les critères de capacité d'accueil, de sécurité / résistance, d'altitude et de hauteur sont considérés comme des critères primaires, c'est-à-dire que ce sont eux qui vont permettre la validation ou non d'un site. Les points d'entrées et de sorties du site, la disponibilité, l'accessibilité ainsi que les services du site sont catégorisés en critères secondaires. Enfin, l'identification du site par la population a été qualifiée de critère tertiaire, car cette limite pourrait être techniquement facilement levée avec des panneaux informatifs. Ceci est moins vrai en ce qui concerne les décisions politiques. Précisons que ce tsunami étant déclenché par un tremblement de terre, l'utilisation de l'application Isibat (Davoine *et al.*, 2013) qui permet de collecter l'information sur la résistance des bâtiments aux séismes verrait ici toute son utilité. En effet, dans le cadre de notre analyse, l'identification de la résistance des structures des ERP aux séismes s'est faite uniquement à partir de la connaissance de la date de construction qui permet de distinguer les constructions parasismiques ou non.
- Chaque critère a été pondéré²⁴ selon leur niveau d'importance dans la hiérarchie des métacritères primaires, secondaires, tertiaires. Pour donner un exemple, la capacité d'accueil d'un site refuge a été évaluée à partir de l'espace réellement disponible en fonction de sa surface au sol, du nombre d'étages, et de l'espace d'accueil (Budiarjo, 2006) avec un coefficient de pondération trois car elle appartient à la classe des critères primaires.

²⁴ Les critères primaires ont eu leurs notes multipliées par un coefficient trois, les critères secondaires par un coefficient deux, correspondant à une importance moyenne du critère, et enfin, le dernier critère par un coefficient un.

Figure 37 – Les critères de détermination d'un Etablissement à Recevoir du Public à devenir un site refuge (Source : M. Bantegnie et D. Provitolo, 2015)



7.2.2. Des communes littorales inégalement pourvues en sites refuges

Cette méthodologie a été appliquée aux communes limitrophes de Saint-Laurent du Var et de Nice. Elles ont été identifiées à partir des résultats obtenus sur les délais d'intervention des Services de Secours (Fig. 36). La cartographie a mis en avant une zone d'interface à forte vulnérabilité entre les deux communes. En outre, ces communes présentent des caractéristiques propres : Saint-Laurent-du-Var est une commune peu étendue, séparée de Nice par l'embouchure du Var. En cas de tsunami, ce fleuve pourrait jouer un rôle capital dans l'expansion des dégâts, l'onde de tsunami pouvant en effet remonter le fleuve et provoquer des inondations bien plus loin dans les terres que pourrait le faire un simple déferlement côtier. La ville de Nice, en revanche connaît un littoral étendu sur près de dix kilomètres et présente des enjeux majeurs : son aéroport international construit sur la mer, la Promenade des Anglais fréquentée par vingt mille personnes par jour et ses plages régulièrement très peuplée (Photo 5).

Les cartographies obtenues fournissent un outil de diagnostic intéressant pour les acteurs opérationnels. Elles mettent en lumière le fait que la ville de Nice est marquée par une dichotomie est/ouest en termes de répartition des sites refuges (Fig. 38) et que ces derniers sont en nombre insuffisant au sein de la commune de Saint-Laurent-du-Var (Fig. 39). L'interface entre les deux communes est là encore vulnérable. Cette répartition hétérogène soulève une autre question : vaudrait-il mieux, pour la gestion de crise, disposer de nombreux sites refuges ou de quelques abris ? La première solution facilite l'évacuation en de nombreux endroits du territoire et doit permettre une mise en sécurité plus rapide que la deuxième solution. Mais elle a également un coût financier, celui

d'assurer la gestion multisite. Les diagrammes de Voronoï avec les polygones de Thiessen peuvent apporter des éléments de réponse car ils permettent d'évaluer et représenter les zones d'influence par différentes tailles de polygones.

Photo 5 – Une forte fréquentation sur les plages de Nice (© D. Provitolo, Juillet 2019)



Figure 38 – La cartographie des sites refuges pour le scénario de tsunami extrême (S11) sur la commune de Nice (Source : M. Bantegnie, encadrement D. Provitolo, 2015)

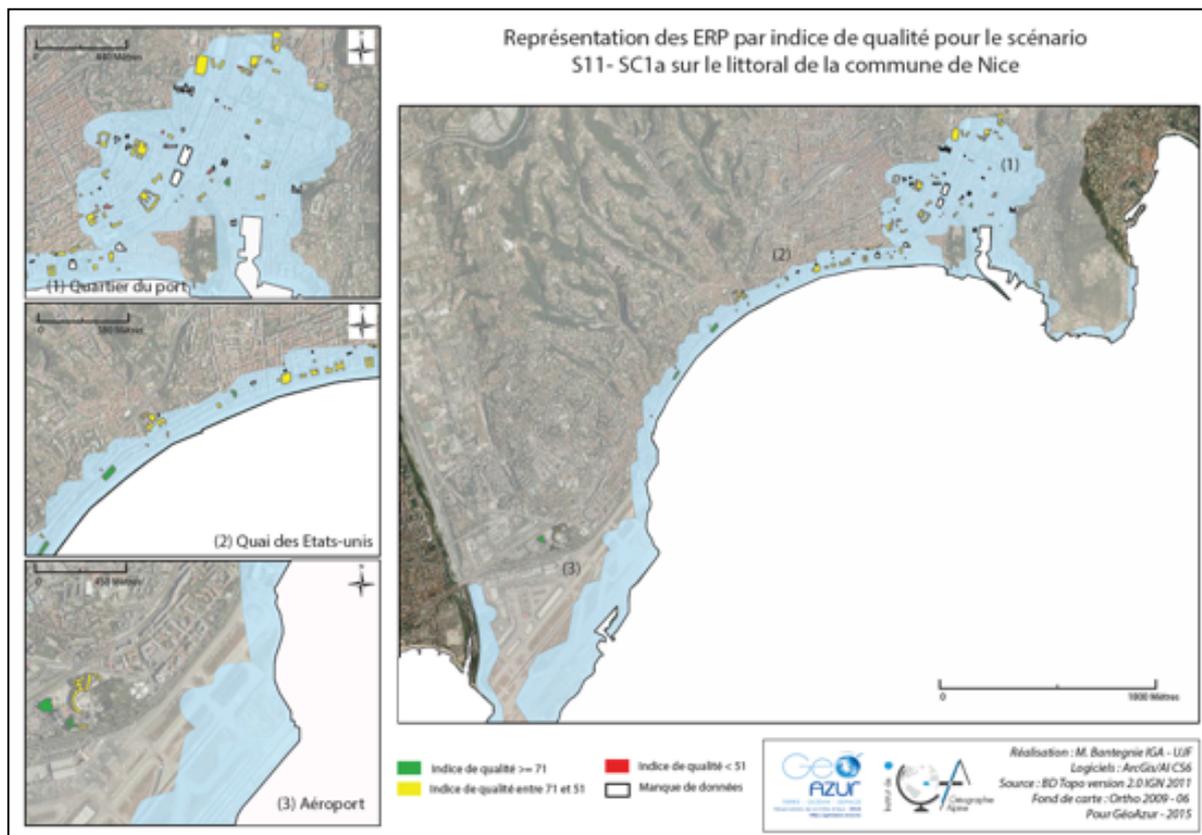
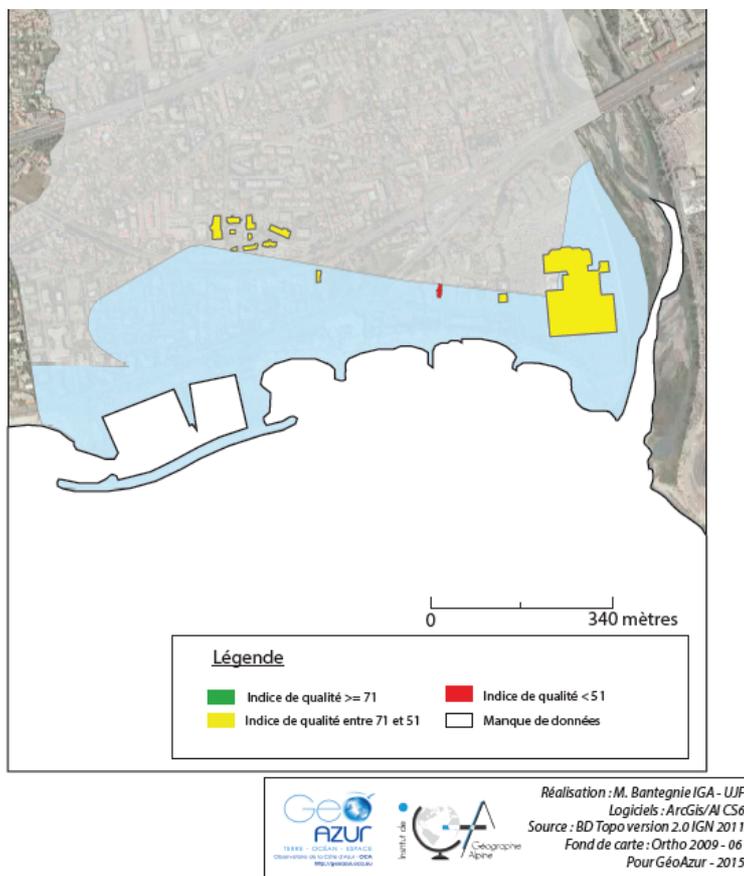


Figure 39 - La cartographie des sites refuges pour le scénario de tsunami extrême (S11) sur la commune de Saint-Laurent-du-Var (Source : M. Bantegnie, encadrement D. Provitolo, 2015)



Les modélisations cartographiques obtenues sont instructives pour révéler des zones territoriales particulièrement vulnérables ou pour lesquelles différentes zones d'abris pourraient être envisagées. Ces modèles cartographiques et de localisation optimale sont donc des outils de diagnostic avec un fort pouvoir de communication auprès des acteurs institutionnels. Ces modèles fournissent une aide à la décision pour les décideurs, non pas en temps réel mais durant le processus d'anticipation et de planification des risques. Ce processus doit aussi intégrer la diffusion de la connaissance vers les populations pour les amener à évacuer et utiliser les sites refuges en cas d'évacuation d'urgence.

Ce point est primordial. Les enquêtes réalisées en août 2014 dans le cadre du programme européen ASTARTE²⁵ sur les comportements humains en cas de tsunami d'origine sismique sur le littoral azuréen (Fig. 40) ont montré que la population est insuffisamment préparée à l'évacuation (Figs. 41 et 42).

²⁵ Collaboration à la réalisation du questionnaire de perceptions et réactions au risque de tsunami qui a été déployé sur l'ensemble des terrains du projet (Maroc -Tanger, Italie - Syracuse, Espagne - Baléares, Portugal – Sines). En tant que partenaire local, identification des trois sites d'enquêtes sur le littoral azuréen, contribution à leurs analyses et suivi des deux étudiants sur le terrain en Master 1, J. Lopes et C. Charpentier (2014).

Figure 40 – Les différents sites d'enquêtes sur le littoral azuréen – Programme européen ASTARTE (Réalisation : D. Provitolo, 2014)



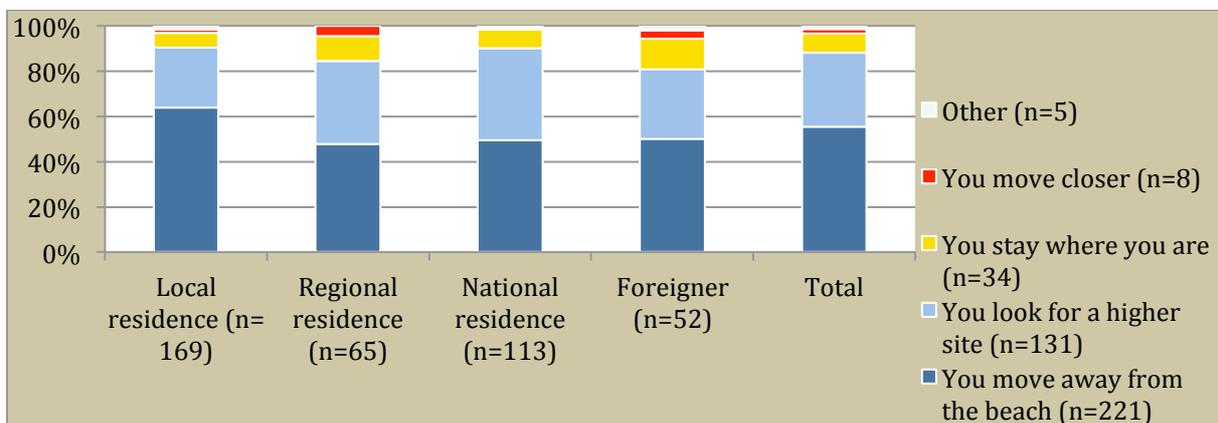
Tableau 4 - Le profil des enquêtés (Source : C. Charpentier, 2014)

| Nombre d'enquêtés | Répartition des enquêtés par site d'enquête | Sexe-Ratio | Moyenne d'âge | Origine géographique des enquêtés |
|-------------------|---|-------------------------------|---------------|--|
| 400 | Nice = 172 Saint-Laurent-du-Var = 146 Villefranche-sur-Mer = 82 | 51% de femmes 48% d'hommes | 48 ans | 44,1% de touristes ou de résidents occasionnels (13% venant de pays étrangers) 58,8% de résidents locaux ou régionaux |

Les résultats d'enquête révèlent que :

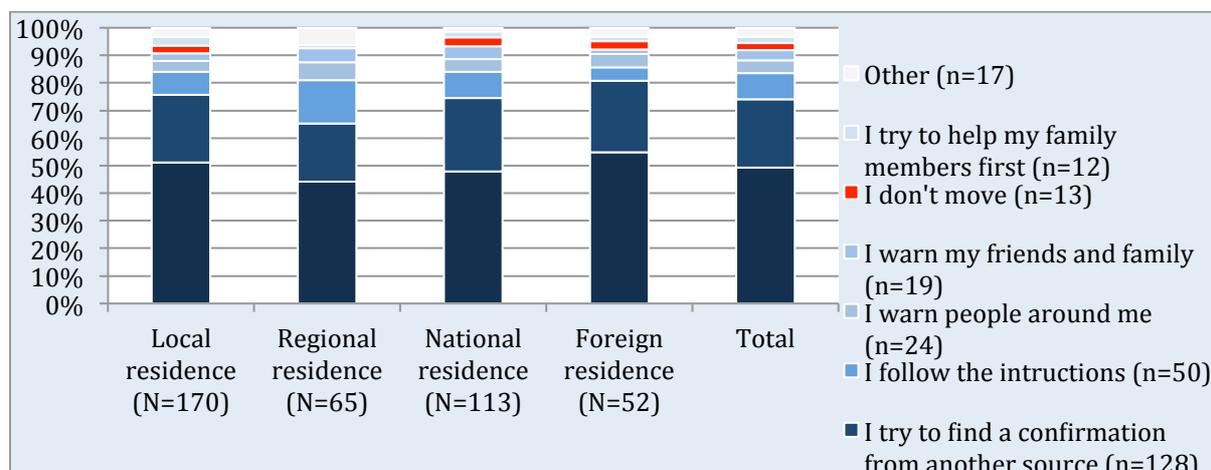
a) les deux tiers des personnes interrogées (64,6%) se « retireraient du front de mer » si elles ressentiaient un tremblement de terre, mais il est important d'indiquer que l'autre tiers (30,2%) « resterait sur le front de mer, car il se sente en sécurité ». Les résidents « locaux » sont les moins nombreux à vouloir évacuer le front de mer en cas de séisme 60,4% : contre 71,9% des « régionaux », 63,7% des « nationaux » et 71,2% des résidents « étrangers ». Si le niveau de la mer baissait soudainement (ce qui reste peu probable, excepté dans des zones portuaires, sur ce terrain où le plateau continental est très pentu), plus de la moitié (55,4%) « s'éloigneraient de la plage » et un tiers (32,8%) « rechercherait un site plus élevé ». Dans ce cas, les résidents « locaux » sont plus nombreux (63,9%) à vouloir « s'éloigner de la plage » alors que les autres répondants préfèrent la recherche d'un site plus élevé (Fig. 41).

Figure 41 - Les comportements envisagés (en %) en cas de baisse soudaine du niveau de la mer (Source : C. Charpentier, 2014 ; J. Lopes, 2014 pour le programme ASTARTE)



b) si les répondants reçoivent sur leur mobile un message indiquant « Attention : tsunami ! Éloignez-vous du rivage », seulement 12,5% d'entre eux « suivraient les instructions données », tandis que près des deux tiers (64,3%) « partiraient immédiatement », et un tiers (32%) « chercherait à obtenir une confirmation d'une autre source », ce qui pourrait constituer une perte de temps considérable et très risquée ainsi qu'une confusion possible. Il est intéressant de noter une réaction similaire entre les différentes classes de répondants même si les résidents « étrangers » sont les moins nombreux disposés à « suivre les instructions » alors que leur connaissance des risques sur le territoire est *a priori* moins développée que les autres répondants (Fig. 42).

Figure 42 – Les comportements envisagés (en %) en fonction de la zone de résidence des enquêtés (en %) (Source : C. Charpentier, 2014 ; J. Lopes, 2014 pour le programme ASTARTE)



Conclusion

Ces modèles décisionnels présentent aussi plusieurs limites. Tout d'abord, la vulnérabilité est cartographiée comme l'antonyme de la résilience. Or, j'ai montré dans la première partie de ce tapuscrit que les relations entre les vulnérabilités et résiliences des territoires sont bien moins binaires. Il s'agirait donc de réfléchir à d'autres formes de cartographies, intégrant le volet de la résilience (Garbolino *et al.*, 2013). L'approche de la résilience du territoire via l'ergonomie spatiale préconisée par E. Propeck-Zimmermann *et al.* (2018), est une solution à envisager. Les auteurs défendent l'hypothèse que « la capacité d'un territoire à récupérer ses fonctions de base après une catastrophe dépend de son niveau de performance globale déjà présent en période normale à mettre à disposition des ressources (au sens large : services, activités, ravitaillement, communication, etc.) ». On retrouve là l'idée de ressources et de capacités disponibles présentées dans le modèle de « vulnérabilité résilience » (Provitolo, 2012, 2013).

De plus, avec ces cartographies, les relations entre les éléments du territoire sont linéaires, sans boucle de rétroaction. Je rejoins complètement P. Pigeon *et al.* (2018) pour qui « la spatialisation des risques fait référence à la seule géométrie d'une localisation, dans un repère spatial absolu, avec toutes les limites de cette lecture. Elle entrave la prise en compte d'enjeux différents posés à l'échelle du système Cat-Nat et à celle des conseils communaux. Enfin, la spatialisation des risques ne permet pas de montrer les limites de l'analyse du risque, tout particulièrement lorsqu'elle se fait en silo, ignorant par exemple des problématiques d'emploi ou de développement territorial des communes ».

Enfin, l'intégration de la dimension temporelle est imparfaite. Les cartes proposées sont diachroniques et non dynamiques. Or, la dimension temporelle et plus spécifiquement les processus spatio-temporels font partie intégrante de la gestion des catastrophes et de la connaissance des risques (Davoine, 2014). D'autres pistes de recherche sont ainsi proposées par Ch. Aschan-Leygonie *et al.*, (2019) pour intégrer les nouvelles technologies (Google Earth, Géoportail, Réalités virtuelles), visualiser des résultats issus de simulation et représenter l'information géographique dans les SIG afin de mieux gérer les risques.

Dans le cadre des projets pluridisciplinaire RITMICA et PORTE, de la thèse de Laurie Boschetti que je co-encadre avec E. Tric, et en partenariat avec le Centre de Recherche sur les Risques et les Crises de MINES ParisTech (co-encadrement avec E. Garbolino du stage de Master 2 de Fanny Romeo), de nouveaux diagnostics des vulnérabilités et résiliences territoriales du littoral azuréen au risque de tsunami d'origine sismique seront réalisés afin de dépasser les limites ci-dessus mentionnées. Ces diagnostics prendront également en compte les résultats récents de simulation et cartographie de l'emprise spatiale de l'inondation par tsunami, de la hauteur d'eau et des courants proposés par L. Boschetti *et al.* (2019) (Fig. 50) à partir de la résolution fine de données bathymétriques.

Les méthodologies et les résultats obtenus fournissent des éléments sur les manières de préparer les réponses des villes et sociétés littorales aux défis des phénomènes naturels extrêmes et de leurs conséquences. Du fait de collaborations pérennes avec différents partenaires institutionnels et opérationnels, les connaissances peuvent être directement exploitées au sein du SDIS 06 ou transférées vers le monde des services territoriaux (Préfecture des Alpes-Maritimes, Direction de la Prévention des Risques Majeurs de la Ville de Nice avec qui je collabore régulièrement dans le cadre de projets, d'exercices Richter et de cellules de gestion de crise sismique).

En sus de ce transfert de connaissances et de résultats vers le monde des organisations de sécurité et des collectivités locales (objectifs territoriaux), je participe à des actions menées plus spécifiquement vers la société (objectifs citoyens). Il ne s'agit pas là de proposer des modèles décisionnels mais de participer à des actions permettant de rendre plus opérationnel le concept de résilience.

Chapitre 8

Des actions pour une résilience opérationnelle

Ces actions ont été effectuées au côté des décideurs publics avec l'élaboration d'un protocole de communication sur la culture du risque d'inondation et la réalisation d'ateliers de sensibilisation aux réactions humaines lors de catastrophes.

8.1. Un protocole de communication sur la culture du risque d'inondation

Lors d'une catastrophe, les réactions des victimes sont sources d'incertitude, ce qui peut participer à aggraver la vulnérabilité des personnes, mettre en péril la vie des sauveteurs et finalement accroître la difficulté de maîtrise des situations par les acteurs en charge de la gestion des crises.

En France, les politiques publiques se mobilisent donc pour sensibiliser, communiquer et préparer la population à réagir à la survenue éventuelle de catastrophes, notamment dans le cas d'inondation (débordement d'un cours d'eau, ruissellement urbain, rupture de digue, submersion marine etc.). Ce risque concerne en France près de 17 millions de personnes, 1 habitant sur 4, 1 emploi sur 3 (Source : EPRI). Dans le Sud-Est, la population est particulièrement exposée aux risques d'inondation par cours d'eau puisqu'au moins 20% de cette population habite en zone inondable et que 30% des logements sont concernés par ce risque (Source : SOeS d'après Medde, Cartorisque, 2013). Il s'agit donc d'amener les citoyens à gérer leur propre sauvegarde, réduire la dangerosité des situations, adopter des comportements adaptés à la situation comme éviter de conduire sur une route inondée ou de sortir en pleine tempête pour bâcher un toit qui vient de s'envoler, et faciliter par là-même le travail des secours lors de leurs interventions. Dans ce cadre, un ensemble d'outils réglementaires sont à disposition du public : PPR Inondation, DICRIM, PFMS, PPMS... Malgré leur existence, ces outils restent peu connus et peu mobilisés par la population.

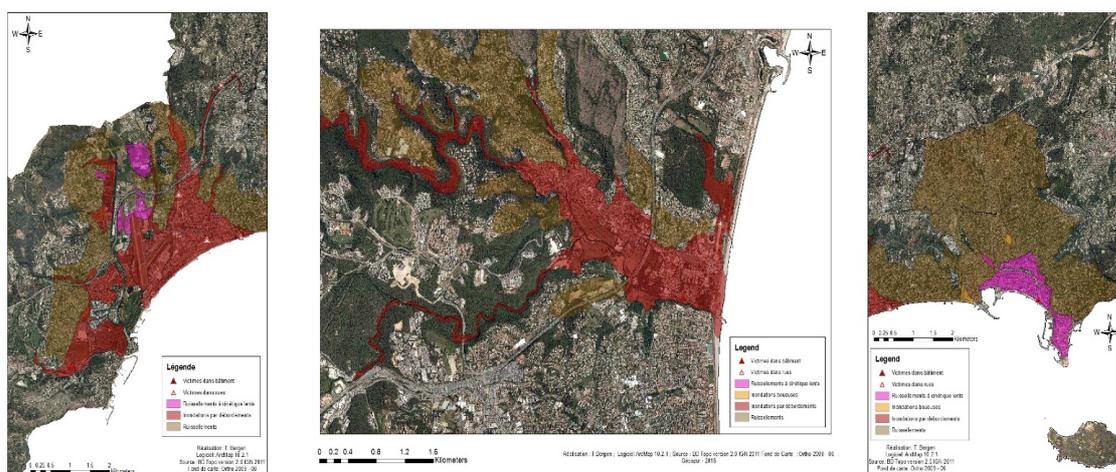
Sur le territoire de la Côte d'Azur, les intempéries d'oct. 2015 sont considérées comme un événement dramatique car la majorité des pertes humaines est liée à des comportements inappropriés. Outre le coût économique, vingt personnes ont perdu la vie, dont 2/3 du fait de comportements non adaptés à la situation de montée des eaux : descente des personnes dans des points bas comme des sous-sol ou des tunnels routiers. La plupart des victimes ont été piégées dans des parkings souterrains en tentant de sauver leurs véhicules.

Le 3 octobre 2015, des précipitations soudaines et intenses (on relève par exemple 106 mm en une heure à la station Météo France de Cannes/Mandelieu ou 74 mm en une heure à Nice, ces deux valeurs constituant les records de stations-météo pour les cumuls horaires depuis le début des relevés) ont engendré une catastrophe urbaine sur le littoral de la Côte d'Azur et plus spécifiquement entre les communes de Mandelieu et Nice. Ces pluies violentes ont provoqué le débordement de plusieurs cours d'eau et de nombreux ruissellements urbains (Fig. 43).

Figure 43 – La cartographie de l’extension spatiale des inondations sur les communes de Mandelieu, Biot et Cannes : exposition et vulnérabilité biophysique (Source : T. Bergen, encadrement D. Provitolo, Géoazur, 2016)

Légende : Cette cartographie de l’extension spatiale de l’inondation et des dégâts matériels et humains a été réalisée à partir d’analyses de photos et de vidéos. Le contenu visuel des photographies et des vidéos a été analysé de façon empirique, en fonction des éléments que nous avons perçus sur le support visuel. Ces éléments ont été organisés au sein de différentes rubriques : la localisation des prises de vue et les faits figurant sur l’image (l’espace représenté à différentes échelles de la commune au quartier, les dégâts matériels, l’inondation).

En rouge : inondations par débordement / En violet : ruissellements à cinétique lente / En marron : ruissellements



Cet évènement a mis en difficulté un territoire s'étendant sur plus de quarante km le long de la côte, de Théoule-sur-Mer à Nice, et a pris très rapidement une tournure catastrophique. Au niveau du bilan économique, dix-sept mille véhicules ont été endommagés ou détruits, les dégâts s'élèvent à six cent quatre-vingt-dix millions d'euros (quatre-vingt-cinq millions d'euros pour les collectivités locales sur les équipements publics et six cent cinq millions d'euros de dégâts assurés d'après l'Association Française de l'Assurance), et trente-deux communes des départements des Alpes-Maritimes et du Var ont été placées en état de Catastrophes Naturelles dès le 7 octobre 2015.

Ce caractère exceptionnel a mis en évidence les difficultés des acteurs de la gestion de crise à gérer un évènement soudain : ruptures des communications terrestres (Fig. 44), dommages aux véhicules d'intervention (Photo 6), saturation des réseaux de communication (l'appel en grand nombre des numéros d'urgence par la population a déclenché la saturation des lignes du SDIS 06 - entretiens avec le commandant F. Fiorelli et le lieutenant-colonel F. Castagnola, SDIS 06).

8.1.1. Le constat et l'objectif du protocole de communication

8.1.1.1. Le constat : Développer la culture du risque pour réduire les vulnérabilités humaines face aux inondations

Face aux inondations, les vulnérabilités des populations sont de plusieurs ordres. Elles sont liées :

- **A la fragilité physique de l'être humain :**
Vulnérabilité à la hauteur d'eau, au courant et à sa température.
- **A l'inadaptation des constructions :**
Lors d'une inondation par débordement de cours d'eau, on pense aux possibilités d'évacuation verticale lorsque les logements offrent la possibilité d'une mise à l'abri dans les étages. Ce type d'évacuation n'est en revanche pas possible pour les pavillons de plain-pied construits en zone inondable et qui sont de fait l'ennemi n° 1 en cas d'inondation car source de mortalité. Ces derniers sont les cas le plus dangereux car ils n'assurent pas la protection des résidents. Cette situation interroge plusieurs aspects de l'aménagement du territoire : le choix des implantations dont découlera le type de construction (Rapport Cour des Comptes 2012). Ces aspects sont désormais régis dans le cadre des PPR Inondation.
Pour les quartiers neufs exposés au risque d'inondation, il doit désormais être envisagé d'adapter les constructions aux aléas climatiques (par exemple, construire des logements au-dessus du niveau des eaux, préférer les constructions sur pilotis aux constructions de plain-pied, dédier les niveaux inférieurs et rez-de-chaussée à des zones de parking). Pour les quartiers existants, le défi est plus difficile à réaliser, aussi bien techniquement que financièrement (Cepri, 2009, 2010). La culture du risque et la formation de la population sont encore plus nécessaires dans ces territoires.
- **A l'inadéquation entre la perception des risques d'inondation et la réalité de l'évènement :**
Les inondations frappent brutalement des personnes qui, pour la plupart, ignorent leur exposition à un risque potentiel. Lors de la tempête Xynthia (2010), une grande partie des décès lors d'inondation est due au fait que les habitants ont été piégés chez eux, barricadés dans un logement de plain-pied, où ils se croyaient à l'abri et en sécurité contre l'évènement « tempête » annoncé (Pigeon, 2012).

Photo 7 – Des maisons vendéennes inondées lors de la tempête Xynthia en 2010



Le même constat a pu être établi lors de l'ouragan Katrina (2005) à la Nouvelle-Orléans : 1800 décès du fait de la rupture des digues et de l'inadéquation entre la perception du risque et la réalité de l'évènement : l'ordre d'évacuation a été donné parce qu'un cyclone allait venir et non parce que les digues pouvaient céder (Przyluski et Hallegatte, coord. 2012).

- **A des comportements à risques, réfléchis ou non :**

F. Vinet *et al.*, (2011) ont mis en lumière le fait que lors des inondations de 2010 dans les départements du Var (crues torrentielles), de Vendée et de Charente-Maritime (submersion marine), les cas de décès sont caractérisés par un point commun : « elles révèlent souvent une prise de risque ou une sous-estimation du danger par les personnes ». Ces conduites à risque, que l'on observe le plus souvent à l'extérieur du domicile, sur la voie publique, questionnent la responsabilité de la victime dans la mise en danger de sa propre vie et de celle des autres.

Ces comportements sont notamment largement induits par les stratégies d'évitement. Ces dernières sont paradoxales car elles sont nécessaires à notre sentiment de sécurité au quotidien mais elles nous éloignent également de la conscience du risque et de notre effort de préparation.

Ces stratégies d'évitement sont de trois ordres et reliées aux composantes du risque (Castagnola, 2017) :

- L'optimisme comparatif s'applique à l'enjeu : « cela n'arrive qu'aux autres »,
- Le déni concerne l'aléa : « tout va bien, il n'arrivera rien »,
- La minimisation porte sur la vulnérabilité : « cela n'est pas grave, je vais traverser la crise, je vais m'en sortir ».

Lors des inondations, les vulnérabilités des populations sont donc multiples et les réactions adoptées par ces dernières ne sont pas toujours adaptées à l'évènement

(Moussaid et Theraulaz, 2011). Cela participe à accroître la difficulté de maîtrise de la situation par les opérationnels en charge de la gestion des crises.

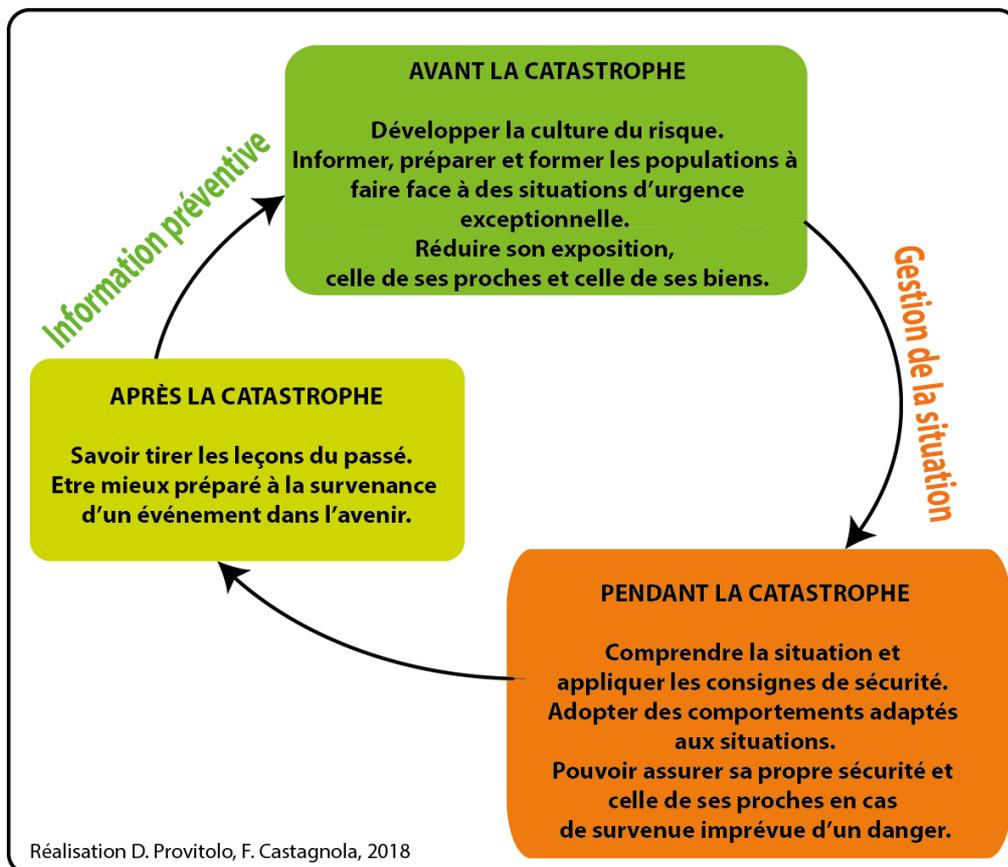
8.1.1.2. L'objectif : élaborer un protocole de communication de la culture du risque auprès des populations

Un protocole de communication dans ce domaine doit participer à convaincre le citoyen de l'existence des différents types de risque d'inondation sur son territoire de vie et l'amener à adapter ses comportements. Ce protocole constitue un socle de réflexion pour mener des actions :

- d'information et de communication,
- de sensibilisation et de préparation sur le long terme à des situations d'urgence exceptionnelle.

Ces mesures doivent être dispensées avant l'évènement et aborder les actions à mener durant les 3 phases d'une inondation : avant – pendant - après. Ces actions doivent permettre à la population d'être acteur de sa propre sécurité (Loi n° 2004-811 du 13 août 2004 de modernisation de la sécurité civile, art 4) (Fig. 45).

Figure 45 - Le cycle de la prévention et de la gestion de crise adapté aux comportements humains – (Source : D. Provitolo, F. Castagnola, V. Huet, R. Dreyfus, Rapport SISA, 2018)



8.1.2. La mise en place du protocole de communication

Il s'agissait alors de proposer un plan type de communication pour engager le citoyen sur des mesures d'analyse du risque et d'autoprotection. Ce protocole a permis de répondre à plusieurs questions : quelles informations transmettre à la population ? quels sont les groupes à cibler, les canaux d'information à mobiliser, les leviers d'actions efficaces permettant à la population de devenir « acteur » de sa sécurité (via des mesures de réduction de la vulnérabilité de leur habitation par exemple, via une meilleure connaissance du risque et des comportements à adopter...).

8.1.2.1. Les informations essentielles à communiquer au citoyen

Dans le cadre d'un protocole de communication destiné au grand public, j'ai identifié avec les acteurs institutionnels avec lesquels j'ai collaboré et collabore toujours (SDIS 06 – SISA –SMIAGE) cinq thématiques d'information essentielle à transmettre dans le cadre de la prévention des risques. Ces thématiques traitent des actions que le citoyen devrait réaliser en contexte d'exposition au risque d'inondation et en cas de déclenchement d'une inondation. Elles sont donc organisées au regard de la temporalité de l'évènement.

a) Avant tout évènement

- **Identifier les différents types d'inondation du territoire** (par exemple débordement de cours d'eau, ruissellement, coulées de boue, rupture de digue ou de barrage, submersion marine etc.)
- **Connaître les comportements de mise en danger**
En cas d'évènement soudain, le danger peut surprendre et déclencher des comportements non adaptés : **lors des inondations d'octobre 2015, vingt personnes ont perdu la vie, dont 2/3 du fait de comportements non adaptés à la situation de montée des eaux** : descente des personnes dans des points bas tels que des sous-sols ou des tunnels routiers. Ces comportements, bien que raisonnés, étaient malheureusement inadaptés à la situation.
Il convient également de sensibiliser la population au fait que **dans le cas d'un évènement qui surviendrait de façon inattendue**, en raison de l'effet de surprise et de peur, **les réactions peuvent être plus instinctives, immédiates et automatiques** (sidération, fuite panique), tout au moins dans les premiers instants du choc (Provitolo, 2016).
- **Se tenir informé**
 - Identifier si l'on réside ou si l'on se déplace dans une zone à risque d'inondation : consulter les outils réglementaires à la mairie (PPR Inondation / DICRIM).
 - Identifier les risques inhérents à l'habitat de plain-pied et prendre des mesures spécifiques à ce type d'habitat :
 - identifier une zone de repli (amis, famille, voisins etc.),
 - porter une attention particulière à la vigilance Météo-France et à la réalisation du PFMS.
 - Etre attentif aux vigilances Météo-France (jaune-orange-rouge).

- Connaître les alertes : s'informer auprès de sa mairie des systèmes d'alerte existant (sirène, système d'appel en masse, vigicrue).

➤ Se préparer

- Réaliser son Plan Familial de Mise en Sûreté (PFMS) :
 - Votre habitat est généralement un abri sûr, excepté l'habitat de plain-pied en zone inondable, et ce particulièrement en l'absence d'évacuation possible par le toit,
 - Renforcer vos stocks de nourriture et de boissons à votre domicile,
 - Préparer votre sac d'urgence avec une autonomie de 72 heures et contenant *a minima* :
 - ✚ Hygiène : papier toilette, hygiène intime, mouchoirs jetables...
 - ✚ Hydratation / Alimentation : eau, denrées alimentaires énergétiques non périssables, couteau multifonction,
 - ✚ Vêtements de rechange : chauds et étanches,
 - ✚ Soins : trousse de secours, médicaments spécifiques selon pathologie (ordonnance),
 - ✚ Energie : lampe torche ou à dynamo, briquet, bougies...
 - ✚ Rester à l'écoute / Se faire entendre et se faire voir : radio à pile, sifflet, gilet fluorescent,
 - ✚ Documents : photocopie des papiers d'identité et d'assurance, argent liquide.
- Réduire l'impact éventuel d'une inondation sur son habitat.
 - Identifier les coupures des fluides : gaz, électricité, eau,
 - Arrimer les cuves (fioul, gaz),
 - Prévoir éventuellement des batardeaux et autres dispositifs de protection ... (Photo 8).

Photo 8 – La mise en place de batardeau anti-inondation à Venise (© F. Castagnola, 2018)



b) Si vous êtes confrontés à un évènement

➤ Réagir face à l'inondation : adopter les comportements de sauvegarde !

- Rester à l'écoute des vigilances Météo-France (jaune-orange-rouge),
- Si vous êtes chez vous :
 - Habitat de plain-pied : alerte météo orange => prêt à l'évacuation // alerte météo rouge => évacuation, Dans tous les cas, rester à l'écoute des autorités,
 - Autres habitats : rester chez soi et monter à l'étage pour vous mettre à l'abri (évacuation verticale), L'évacuation de l'habitat doit se faire sur ordre des autorités ou si la crue vous y oblige, La voiture est sur le parking ou au garage, du fait de la violence des éléments, ne pas la déplacer.
- Si vous êtes sur la route :
 - S'éloigner des zones inondées,
 - Se réfugier sur les hauteurs et rester dans sa voiture,
 - En ville, se réfugier en hauteur dans des bâtiments,
 - Respecter les signalisations des zones interdites à la circulation et ne pas emprunter les voies barrées à cette circulation.
- Appel des secours 112 : conserver son calme – rester simple et concis :
 - Je suis (qui et où),
 - Je vois (quoi, nature et gravité),
 - Je fais (mise à l'abri, évacuation, porter secours, autre).

L'opérateur à votre écoute vous aidera.

8.1.3. Les publics cibles

Pour que la communication soit efficace, on doit savoir à qui s'adresse le message que l'on veut diffuser, lequel doit être clair et porteur, et adapté aux publics cibles. Dans le cas de risques majeurs, les publics cibles concernent l'ensemble des usagers du territoire.

Au sein de ces cibles, il est possible de distinguer différents groupes de population : de très concernés, investis à neutres, voire sceptiques. Ces groupes seront bien évidemment plus ou moins sensibles aux actions de communication. **Ces actions doivent sensibiliser l'individu au rôle clé qu'il joue lors d'une inondation majeure.** Elles doivent l'amener à s'intéresser aux risques majeurs et à se sentir concerné, impliqué dans la gestion de sa propre sauvegarde.

- **Cibler les publics pour savoir à qui s'adresse le message :**
 - Les adultes,
 - Les personnes âgées (environ 30% de la population des Alpes-Maritimes – Source : INSEE 2015),
 - Les handicapés,
 - Les populations hospitalisées,
 - Les enfants,
 - Les adolescents,
 - La population touristique,

- Les entreprises via les Syndicats d'entreprises, les Chambres de Commerce et d'Industrie, la Chambre d'agriculture, les ERP : il s'agit là à la fois de groupes cibles et de canaux de transmission d'information.
- **Cibler les publics pour savoir où ils se situent (géographiquement).**
- **Cibler les publics pour savoir à quel moment communiquer.**

Certaines périodes de l'année sont peu propices aux actions de communication : les périodes de congés, les fêtes de fin d'année. Certains évènements peuvent être utilisés pour mener des actions de communication sur les risques d'inondation : une date anniversaire d'une catastrophe, une nouvelle réglementation. Les moments de la journée sont opportuns pour certains groupes cibles : en semaine durant la journée, on capte davantage les personnes âgées que la population active.

8.1.4. La mise en œuvre de la communication : les canaux de diffusion et le langage

Pour chacun des publics cibles, il convient de réfléchir en amont sur le niveau de diffusion (de masse ou de groupes) des actions de sensibilisation. Ce choix permettra d'identifier les canaux de diffusion à mobiliser au regard des publics concernés.

- **Les canaux de diffusion de l'information doivent être adaptés :**
 - aux caractéristiques de l'information à transmettre (message court ou long, durée de l'intervention, degré d'urgence : ce dernier point concerne la communication de crise et est hors cadre de cette étude),
 - au public visé,
 - au nombre de personnes à atteindre : diffusion de masse ou ciblée.

Les canaux doivent être combinés pour atteindre la diversité des publics et le plus grand nombre de populations (Tab. 5).

Tableau 5 – Les canaux de diffusion

| Niveaux d'action de sensibilisation | Canaux de diffusion |
|--|---|
| <u>Diffusion de masse</u> | <p>Exemples :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Outils réglementaires : DICRIM pour les adultes et DICRIM pour les enfants, PFMS. <p>Ces envois massifs doivent être combinés à des actions plus ciblées en vue d'une appropriation des documents et des mesures à mettre en place pour se protéger.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Rubriques dédiées aux risques majeurs sur des sites institutionnels. - Médias : chaînes télévisées. |

| | |
|--|--|
| | <p>- Panneaux d'information :</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Panneaux repère de crue, ○ Panneaux pictogrammes préventifs et curatifs, ○ Panneaux connectés à message variable. |
| <p><u>Diffusion ciblée sur des groupes</u></p> | <p>Exemples :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Module Impact – SDIS 06 (resp. Lieutenant-Colonel F. Castagnola). - Actions du Conseil Général et des collectivités territoriales auprès des écoles, des collèges et des lycées. - Manifestations publiques récurrentes : Journées Départementales sur les Risques Majeurs (JDRM), Fête de la Nature, Fête du Canal de la Siagne, Fêtes de la Science. - Manifestations publiques ponctuelles : Conférences, Réunions publiques, Bar des Sciences et des Citoyens, Interventions ponctuelles dans les maisons de retraite, les EHPAD, les clubs d'activités pour personnes âgées, les associations etc. - Communication diffusée via les réseaux sociaux : permet d'atteindre les jeunes générations. - Articles dans le journal municipal : permet d'atteindre les habitants. - Sites internet de l'office du tourisme : permet d'atteindre les touristes. - Expositions itinérantes ou non, affiches, plaquettes (peuvent par ex. être magnétiques pour être positionnées sur des surfaces métalliques et éviter de finir au fond d'un tiroir). - Travail avec des associations d'éducation à l'environnement (Méditerranée 2000). |

- **Le langage et les pièges à éviter en matière de communication (Tab. 6)**
 - le langage, écrit ou oral, doit être simple, compréhensible pour le grand public. Éviter les termes techniques, les discours abscons, l'usage d'acronymes non explicités, le jargon technique, scientifique, et ce tant à l'écrit qu'à l'oral,
 - le langage doit être adapté au public visé : adultes, adultes retraités, enfants, adolescents, résidents, touristes, entreprises etc.
 - éviter les négations dans les messages et les consignes de sécurité

Tableau 6 – Un exemple de communication

| Exemples de phrases à éviter | Exemples de phrase à préférer |
|--|--|
| N'allez pas chercher les enfants à l'école | Vos enfants sont en sécurité à l'école. Restez vous-même à l'abri |
| N'encombrez pas les réseaux téléphoniques, ne téléphonez pas | Réservez l'usage des téléphones exclusivement aux urgences vitales |
| Ne sortez pas | Restez à l'abri |

En revanche, la négation ou l'interdiction (généralement une croix rouge) peuvent être utilisées dans les pictogrammes (Fig. 46).

Figure 46 – Quelques exemples de pictogrammes (Source : F. Castagnola, SDIS 06)

| | | |
|---|---|--|
|  |  |  |
| Ne buvez pas l'eau du robinet | Ne téléphonez pas | En cas d'alerte, n'utilisez pas les ascenseurs |

8.2. Des ateliers sur les comportements humains en cas de tremblement de terre et de tsunami

Dans le cadre de différents partenariats avec les acteurs institutionnels et opérationnels de la région PACA Sud (Préfecture des Alpes-Maritimes, de la Direction Départementale des Territoires et de la Mer des Alpes-Maritimes, du Syndicat Mixte pour les Inondations, l'Aménagement et la Gestion de l'Eau (SMIAGE), du Centre Educatif et Professionnel La Nartassière à Mouans-Sartoux et du SDIS 06), je mène également des actions de

sensibilisation de la population à la culture des risques. Une partie de ces actions s'effectue dans le cadre d'ateliers sur les comportements humains.

Changer les comportements relève d'un processus individuel qui peut s'exercer dans un cadre précis, celui de la communication entre individus. Selon Priolo (2005), les campagnes de prévention des risques ne peuvent être considérées comme des actes de communication car seul un émetteur essaie de persuader des récepteurs. Or, l'information n'est pas uniquement linéaire et unilatérale, il est donc important de prendre en compte les interactions entre émetteurs et récepteurs (on retrouve là encore un phénomène complexe).

Dans ce cadre, j'ai proposé et imaginé un atelier intitulé « La terre tremble, qu'allez-vous faire ». Cet atelier a été réalisé auprès de populations distinctes : des adultes et des adolescents, avec des tailles de groupe allant d'une vingtaine de personnes à une centaine. Le personnel volontaire de la Préfecture des Alpes-Maritimes 06, des adolescents et personnels encadrants du Centre Educatif et Professionnel La Nartassière à Mouans-Sartoux, des professeurs investis dans le programme EDUMED Observatory²⁶ ont participé à ces ateliers. Ces actions sont ainsi liées à des projets éducatifs.

J'utilise la méthode des pots-it pour l'animation. Cette méthode permet d'aborder un sujet de façon ludique et d'animer et faire participer le groupe. Les interactions entre émetteurs et récepteurs sont ainsi assurées.

Lors de cet atelier, la salle est divisée en quatre groupes et chaque groupe raisonne sur 1 contexte.

- **Groupe 1 – vous êtes au travail**, vous ressentez qu'il y a un tremblement de terre. La sirène d'alarme ne s'est pas déclenchée,
- **Groupe 2 – vous êtes chez vous**, la maison tremble,
- **Groupe 3 – vous êtes sur la plage**, vous ressentez qu'il y a un tremblement de terre.
- **Groupe 4 – vous êtes en voiture**, vous ressentez qu'il y a un tremblement de terre.

Pour chaque groupe, je demande d'indiquer à chaque participant sur un post-it (le post-it est distribué lors de l'atelier avec une couleur différente par groupe et donc par contexte) quelle serait sa réaction parmi un choix de quatre propositions numérotées de 1 à 4 (Fig. 47) : je m'abrite, je m'enfuis, je ne sais pas quoi faire, je ne m'inquiète pas. Les post-it sont ensuite rassemblés (chaque participant a indiqué son âge et son sexe), regroupés sur un tableau mural et analysés collectivement.

J'obtiens ainsi, en une heure, une heure trente, selon la taille du groupe, le panel des réactions des participants. Mais surtout, durant cet atelier, chaque participant est amené à s'interroger sur ce qu'il ferait effectivement dans le contexte pour lequel il joue mais aussi, en écoutant les réponses du groupe, il s'interroge sur ce qu'il ferait dans les autres

²⁶ EDUMED-Obs, dont je suis membre du Conseil Scientifique, consiste à mettre en œuvre une interface basée sur les données de recherche en géosciences concernant le bassin méditerranéen et orientée vers l'éducation au risque naturel pour le grand public et notamment les lycéens. Cet observatoire éducatif vise à faciliter l'utilisation des données issues de capteurs dans l'enseignement secondaire et supérieur.

contextes. A la fin de l'atelier, une fois que toutes les réponses ont été commentées, j'explique en quoi les réactions choisies sont adaptées ou non à la situation. Ces ateliers assurent ainsi les interactions entre émetteurs et récepteurs et permettent ainsi de prendre en compte la possibilité de transmission de l'information par la cible (durant l'atelier mais aussi après l'atelier, au sein de la famille, des amis etc). Les cibles deviennent des acteurs relais dont le rôle est de transmettre la connaissance. Pour toucher une plus grande partie de la population, celle des collégiens et lycéens, cet atelier a été intégré au programme EDUMED-Obs, observatoire de l'Environnement méditerranéen à but éducatif. Il s'agira ainsi de rédiger les objectifs, le déroulé de l'atelier, la façon de l'animer, de récolter les données, sous forme de fiche de TD pour les enseignants des Sciences de la Vie et de la Terre qui pourront ainsi s'en saisir dans le cadre du programme abordant la question des Risques. Ces fiches seront déposées sur l'interface d'EDUMED-Obs (<http://edumed.unice.fr/fr>).

Figure 47 – Atelier « La terre tremble, comment réagiriez-vous » ? (Réalisation D. Provitolo, 2019)

La Terre tremble : qu'allez-vous faire ?

| Réaction N°1 Je m'abrite | Réaction N° 2 Je m'enfuis | Réaction N° 3 Je ne sais pas quoi faire | Réaction N° 4 Je ne m'inquiète pas |
|---|--|---|--|
| Selon le contexte, quelques exemples | | | |
| Je me mets sous une table solide ou près d'un mur porteur | Je suis en fuite panique Je suis en fuite raisonnée | Je suis tellement sidéré(e), tétanisé(e) par la peur que je ne bouge plus | Je vais boire un café |
| Je reste à l'abri dans la voiture | Je sors de la voiture | J'imité les personnes autour de moi | Je vais me baigner / je continue à bronzer |
| Je recherche le poste de secours | Je m'éloigne du rivage | J'attends des consignes pour agir | |



Publications et communications majeures (par ordre chronologique, selon la codification utilisée dans la liste complète des publications fournie dans le volume 1)

Les modèles décisionnels étant réalisés pour accompagner les décideurs publics, leur valorisation a été effectuée essentiellement dans le cadre de conférences invitées, d'interview filmées, de la rédaction de rapports de recherche et de mémoires transmis aux acteurs institutionnels et opérationnels.

B.27-2017-3 - Boschetti L., **Provitolo D.**, Tric E., « La ville de Nice face aux risques soudains et à dynamique rapide : l'exemple de la submersion marine par tsunami », *ThéQuant*, Besançon, 19 mai 2017.

CI.21-2017-5 - **Provitolo D.**, (2017), « Le risque zéro n'existe plus ! Inondation : comment protéger ma famille » (en partenariat avec la Direction Départementale des Territoires et de la Mer, le SDIS06 et le SISA), *Réunion publique* organisée par la Communauté d'Agglomération du Pays de Grasse, 5 décembre 2017.

CI.19-2017-3 - **Provitolo D.**, (2017), « Accroître la résilience des populations en développant la culture du risque », *Conférence grand public* organisée par le Secours Populaire Français, 3 octobre 2017.

CI.18-2017-2 - **Provitolo D.**, (séance plénière avec B. Cyrulnik, E. Philippe, S. Maire et Y. Jebrak) (2017), « La résilience au cœur des mutations des politiques publiques en général et de l'ingénierie publique en particulier », *Rencontres nationales de l'ingénierie territoriale : Résilience et territoire*, 1-2 juin 2017, Le Havre, France.

CI.16-2016-1 - **Provitolo D.**, Castagnola F., Boschetti L., Huet V., (2016), « Comment réagir face à une inondation ? », *Conférence Grand Public* dédiée à la Culture du Risque, Auribeau Sur Siagne, 23 novembre 2016.

CI.15-2015-4 - **Provitolo D.**, (2015), « Conférence plénière sur la résilience territoriale », *Forum Environrisk sur la Gestion des risques*, Pôle Risque Technopole Arbois, 29-30 sept. 2015.

CI.5-2011-1 - **Provitolo D.**, Colonel Bauthéac, Deschamps A., Bertrand E., (2011), « Bar des Sciences et des Citoyens : tout sur les séismes ! », 23 juin 2011, Théâtre des oiseaux, Nice.

Films, Ateliers et Rapports

Préfecture des Alpes-Maritimes, Direction Départementale des Territoires et de la Mer 06, Centre Educatif et Professionnel La Nartassière – Réalisation, dans le cadre du Plan Départemental Séisme 06, du Clip sismique *La Fissure* (2019) : Intervention en tant qu'expert dans ce film de prévention au risque sismique dédié à la population - Producteur Espace de l'Art Concret de Mouans-Sartoux, Réalisateur Olivier Sarrazin. Lieux de tournage UMR Géoazur et Centre La Nartassière.

Réalisation et animation d'un atelier sur l'adaptation des comportements humains aux risques majeurs (naturels, technologiques et sociétaux) :

CNRS, CEA, CENALT - Un tsunami à Nice, vraiment ? (2017), Intervention en tant qu'expert dans ce film de prévention dédié à la population et réalisé dans le cadre du

projet européen ASTARTE, Producteur Yokwé Films, <https://vimeo.com/209753243>

Rapport SISA-SMIAGE, 2018, Elaboration d'un protocole de communication visant à développer la culture du risque d'inondation auprès de la population (D. Provitolo, F. Castagnola, V. Huet, R. Dreyfus)

Rapport pour le Syndicat Intercommunal de la Siagne 2016, Les comportements humains, individuels et collectifs, en situation de catastrophe (D. Provitolo)

PARTIE 4
MES PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Introduction - Les nouveaux horizons des risques et catastrophes

Le contexte

Cette dernière partie porte sur mes orientations de recherche à court et à long terme. Elles sont en continuité avec mes travaux sur la modélisation des comportements humains et sur les résiliences systémiques mais se démarqueront par des innovations conceptuelles, thématiques et méthodologiques. Ce programme de recherche est parfois déjà soutenu par des financements de projets.

Ces perspectives de recherche sont dans la continuité de mes travaux car ces quarante dernières années ont été marquées par un accroissement important du nombre de catastrophes²⁷, et plus encore de leurs coûts²⁸ et une vulnérabilité humaine toujours forte même si en diminution à l'échelle mondiale. Cette tendance, qui s'observe particulièrement dans les villes qui hébergent plus de la moitié de la population mondiale, ne devrait pas s'inverser dans les années à venir. En effet, les facteurs de risque sont nombreux et imbriqués : changement climatique, tensions géopolitiques, risques liés aux avancées de la technologie et aux besoins des sociétés, croissance démographique et pauvreté, dégradation de l'environnement et pression urbaine (URD, 2010).

Nous avons tous en mémoire des catastrophes dites « d'origine naturelle » (*terme impropre car, comme le fait remarquer Maskrey A. (1993) les catastrophes naturelles sont à la jointure entre deux dynamiques, celle de la Terre et celle de la société*), telles que le tremblement de terre de 2010 en Haïti ou de 2015 au Népal, l'ouragan Katrina en 2005 qui plongera l'Amérique sous le choc, la vague de froid polaire qui s'est abattue sur les Etats-Unis début janvier 2014, les tempêtes qui ont frappé les côtes ouest de la France dès le début de l'année 2014, les incendies en Californie en 2018, ou les catastrophes à dimension multiple comme le séisme et tsunami de 2004 dans l'Océan indien, le tsunami déclenché par une éruption volcanique sur le détroit indonésien de la Sonde en décembre 2018, l'accident nucléaire de Fukushima en mars 2011. Nous sommes également tous confrontés aux nouvelles formes de terrorisme perpétrées non plus seulement par des Etats, mais par des groupes de plus en plus actifs, voire parfois des « loups solitaires », ou des sectes : attentats au gaz sarin dans le métro de Tokyo, attentats du 11 septembre 2001 aux Etats-Unis et ceux plus récents et fréquents en Europe (France, Espagne, Belgique, Allemagne etc.) ou dans des pays plus lointains (Inde, Egypte, Nigéria, Sri Lanka etc.). Nous pouvons également nous projeter vers des risques n'ayant pas encore déclenché de catastrophes mais qui présentent une menace pour la Terre car, en contexte d'incertitude (Reghezza, 2015), ils sont difficiles à prédire, à détecter et arrivent parfois par surprise : on pense notamment aux changements climatiques (dynamique lente) et aux risques de collision d'astéroïdes et de météorites avec la Terre (dynamique rapide) (Garbolino et Michel, 2011).

²⁷ En partant des données du CRED, le nombre de catastrophes passe d'une centaine pour les années 1960 à plus de 800 dans les années 2000. Ces données correspondent à des catastrophes ayant été l'objet d'une assurance partielle sinon complète. Or, du fait d'une perception renforcée des risques, ces derniers sont de plus en plus nombreux à être assurés. On comprend mieux l'augmentation quasi automatique du nombre de catastrophes.

²⁸ La banque mondiale a calculé que « les pertes économiques liées à des désastres économiques sont passées de 50 à 200 milliards de dollars par an entre 1980 et 2012 » (Banque mondiale, 2013).

Tous ces exemples montrent que les catastrophes du XXI^{ème} siècle ont changé de nature : si la plupart d'entre elles relèvent encore du schéma bien connu (une source de danger frappe des populations et des biens vulnérables et produit des dommages à l'échelle de la zone directement exposée), on voit apparaître des risques d'un genre nouveau, que certains ont qualifié de « nouveaux risques » (Godard *et al.*, 2002) ou de risques et catastrophes complexes dont « l'aspect central est la perte du contrôle social et scientifique » (Israel, 2000).

Mon positionnement

Face à la complexité de ces événements où s'enchevêtrent de multiples causalités (par exemple climatiques, biologiques, technologiques, politiques et sociales, économiques, démographiques, écologiques), face à ces menaces ubiquistes et multiscalaires, les défis scientifiques auxquels je souhaite répondre visent un objectif majeur : **améliorer la compréhension des risques et des catastrophes extrêmes et soudaines afin d'assurer une plus grande sûreté et sécurité des populations, des « secteurs mêmes de la sécurité » (armée, police, renseignement) et des villes, en particulier littorales, dans un avenir proche ou lointain.**

Le choix de travailler sur les littoraux urbanisés n'est pas anodin, ces derniers étant identifiés comme les espaces les plus vulnérables de nos territoires : ils sont le lieu d'intenses développements urbains et de fortes pressions anthropiques, avec toutes les conséquences que cela peut avoir sur la vulnérabilité humaine, la multiplicité des risques anthropiques induits, la modification des environnements, etc.

Je développerai ainsi deux axes de recherche complémentaires permettant de décliner l'étude de la résilience sur trois échelles d'analyse (micro-méso-macro) :

- La résilience, la sécurité et la sûreté des populations : « prédire » et anticiper les comportements humains, individuels et collectifs leurs dynamiques spatio-temporelles et les évacuations d'urgence (chapitre 9),
- La résilience des villes et des organisations dans un contexte de changements globaux : rendre opérationnel le concept de résilience (chapitre 10).

Ces perspectives de recherche se démarqueront par des innovations thématiques, conceptuelles et méthodologiques qui permettront d'apporter des outils qualitatifs et quantitatifs pour évaluer les résiliences avec :

- **une innovation thématique et méthodologique en proposant une diversité d'approches d'observation, d'enquêtes et d'expérimentations sur le terrain et par réalité virtuelle pour mieux cerner les comportements humains et le rôle de facteurs contextuels, situationnels et sociaux sur ces derniers.** L'articulation de différentes méthodologies permettra d'analyser les réactions humaines potentielles à plusieurs échelles, celle de l'individu (le niveau micro), celle du collectif (le niveau macro). De plus, pour « prédire » les comportements, les modélisations mathématiques seront alimentées par les résultats obtenus et prendront en compte i) des effets bien connus en géographie des risques, ceux des pertes humaines et de l'impact des effets de dominos sur les réactions, ii) des apports des sciences cognitives afin d'associer le rôle de l'influence sociale et des émotions dans les comportements de foule, iii) du rôle des technologies

interactives pour réagir instantanément à un message permettant des mises à l'abri rapide ou l'organisation de secours d'urgence (Dortier, 2014).

- une innovation méthodologique en intégrant le rôle de la configuration spatiale dans la modélisation mathématique des dynamiques des réactions humaines et des évacuations en combinant théories des équations différentielles et des réseaux complexes. En géographie, le plus souvent, l'introduction de l'espace se fait de façon généralisée par la mobilisation des Systèmes d'Information Géographique. Ces outils, très pertinents pour traiter notamment de questions d'aménagement du territoire, permettent difficilement de prendre en compte les mécanismes en jeu. Les mécanismes peuvent être traités soit *via* les automates cellulaires et les systèmes multi-agents (par exemple traitant des mécanismes de coordination, de décision) soit par les systèmes dynamiques (par exemple traitant des mécanismes de rétroaction, de diffusion, d'imitation) avec le repérage des bifurcations, des effets de seuil et des points fixes.

J'emprunterai avec mes collègues du groupe de recherche Com2SiCa cette voie originale des systèmes dynamiques qui reste encore à explorer et sera spécifiquement mobilisée pour l'étude des dynamiques spatio-temporelles des comportements humains en contexte de foule lors de catastrophes extrêmes et sans signe précurseur. Ce choix de modélisation des comportements humains ne peut se faire sans une collaboration étroite entre les thématiciens géographes et psychologues, spécialisés dans le domaine des risques et des comportements humains, et les modélisateurs mathématiciens et informaticiens, spécialistes des théories des équations différentielles, des équations aux dérivés partielles et des réseaux complexes. Pour rendre les résultats appropriables par les chercheurs et les acteurs, des restitutions sous forme cartographique et de plate-forme web seront réalisées.

- une innovation conceptuelle et méthodologique visant à rendre opérationnel le concept de résilience. En effet, il ressort de la majorité des recherches que ce concept reste abstrait, polysémique et difficile à mettre en œuvre. Pour dépasser ces limites, je mobiliserai des approches qualitatives et quantitatives. Qualitativement, il s'agira d'élaborer des modèles reproductibles et opérationnels comme cadre de réflexion pour « construire, penser » des villes et des organisations résilientes. Quantitativement, il s'agira de proposer des mesures de résilience établies soit de façon empirique (par exemple le temps de remise en état d'un réseau d'infrastructures critiques), soit de façon analytique (avec une fonction mathématique).

Les résultats produits (modèles systémique, mathématique et indicateurs de mesure) devront être mobilisables tant par la communauté scientifique pour établir des comparaisons de territoires résilients, que par les acteurs opérationnels et institutionnels dans leur démarche de construction et d'évaluation de villes et d'organisation résilientes.

Chapitre 9

La résilience, la sécurité et la sûreté des populations : « prédire » et anticiper les comportements humains, individuels et collectifs, et leurs dynamiques spatio-temporelles

Mes orientations de recherche viseront à relever l'un des défis actuels de la recherche, celui de progresser dans la compréhension et la capacité à anticiper les comportements humains, individuels et collectifs, et leurs trajectoires spatiales, face à des menaces ou des catastrophes de toute origine (naturelle, technologique, sociétale). La façon de prévoir ou anticiper les réactions humaines détermine en effet la manière dont nous gérons les situations d'urgence (Drury et Reicher, 2011), permet d'améliorer la résilience des populations et des sociétés ainsi que la maîtrise des situations et leur évolution spatio-temporelle.

Les objectifs

A la frontière entre Sciences Humaines et Sociales, Mathématiques et Informatique, et la sphère des décideurs publics, la problématique des réactions humaines individuelles et collectives lors de catastrophe est complexe du fait de la difficulté à identifier et décrire les comportements et les processus en jeu, à les modéliser et les simuler par des formalismes mathématiques.

En partenariat avec des collègues géographes, psychologues, mathématiciens, informaticiens, géophysiciens et des partenaires institutionnels et opérationnels en charge d'assurer la sécurité et la sûreté des citoyens et des territoires avec lesquels j'ai développé des collaborations pérennes depuis 2013, nous articulons une recherche fondamentale et impliquée afin de :

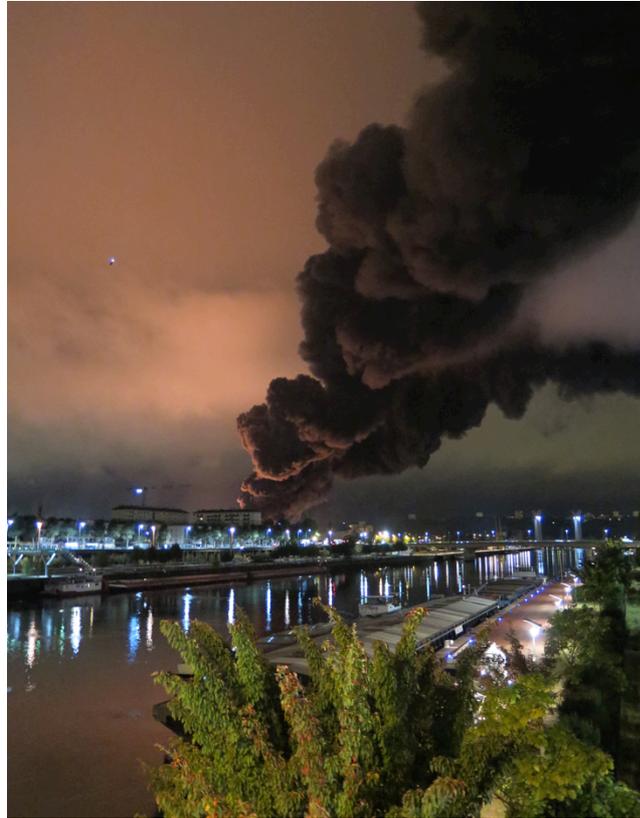
- comprendre, simuler et prévenir les comportements individuels et collectifs des populations dans leurs dimensions spatio-temporelle, contextuelle et socioculturelle,
- développer avec les acteurs institutionnels un socle de connaissances leur permettant de transmettre l'information à la société civile,
- transférer les connaissances et les résultats issus de la recherche fondamentale vers le monde des décideurs publics et des organisations en charge de la sécurité (objectifs territoriaux) par le biais d'un outil dédié : une plate-forme web cartographique de simulation et d'anticipation des réactions humaines.

Cette recherche s'inscrit dans le cadre du programme Com2SiCa (COMprendre et SIMuler les COMportements humains sur des territoires en situation de CATastrophe : de l'analyse à l'anticipation) que je coordonne et anime depuis 2013 et pour lequel j'ai obtenu de nouveaux financements depuis 2018 *via* l'ANR – Défi 9. Ce programme est également cofinancé par la Direction Générale de l'Armement et le Secrétariat Général de la Défense et de la Sécurité Nationale.

Dans la continuité de nos travaux antérieurs, cette recherche est menée, du côté des enquêtes, sur deux terrains : le littoral de la Côte d'Azur exposé aux risques de submersion marine et aux menaces d'attentats et l'agglomération havraise exposée aux risques liés à la présence d'installations nucléaires et industrielles (explosion, incendie, diffusion de

produits toxiques etc.). L'incendie du 26 septembre 2019 au sein de l'usine chimique Lubrizol à Rouen confirme bien la réalité de ce type d'accident (Photo 9).

Photo 9 – L'incendie de l'usine chimique Lubrizol, Rouen (© S. Haule, 26 septembre 2019)



Avec ce groupe pluridisciplinaire (géographes, psychologues, mathématiciens, informaticiens, géophysiciens et des partenaires institutionnels et opérationnels), nous nous affranchissons ainsi des cloisonnements traditionnels pour pouvoir couvrir trois volets fondamentaux de la recherche en combinant des méthodes d'observation, de modélisation et de simulation ci-après présentées.

9.1. Des méthodes d'observation, d'enquêtes et d'expérimentation

Il est techniquement possible d'instrumenter la terre en continu pour obtenir des données en temps réel sur nombre d'aléas (notamment sur les tremblements de terre grâce aux capteurs sismiques). En revanche, pour connaître les réactions des populations, il est techniquement plus difficile et éthiquement plus contestable de contrôler en continu l'être humain dans l'attente d'un éventuel événement catastrophique, ou dans l'espoir d'en éviter un.

Les principales sources d'information sur les comportements adoptés lors d'une catastrophe spécifique restent les expérimentations en laboratoire ou sur le terrain²⁹, les

²⁹ Sur le terrain, les simulations d'évacuation sont difficiles à mettre en place, elles sont le plus souvent effectuées en milieu fermé (par exemple sortir le plus rapidement possible d'un bâtiment).

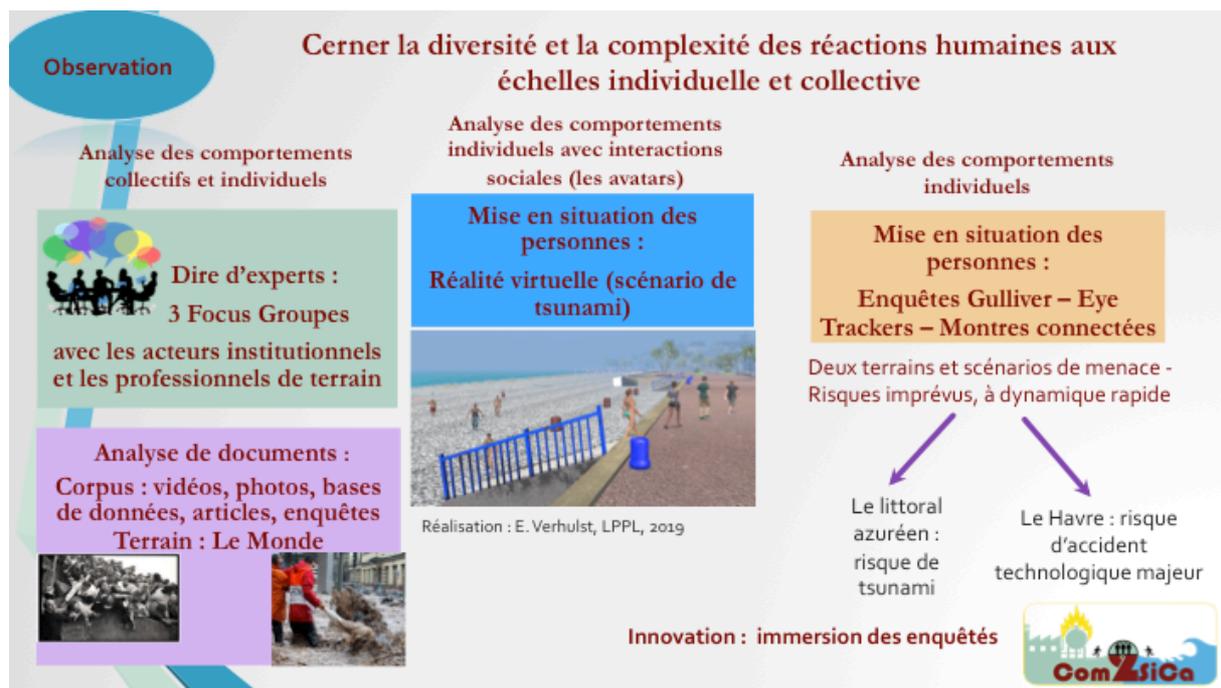
entretiens et les enquêtes réalisés auprès des acteurs de terrain, des populations et des victimes après une catastrophe (Navarro *et al.*, 2016).

Les questions de recherche et les objectifs

Dans le programme Com2SiCa, le groupe de recherche propose d'articuler des méthodologies d'observation, d'enquêtes et d'expérimentations sur le terrain et par réalité virtuelle (Fig. 48) pour répondre à plusieurs questions :

- Quel est le panel de comportements humains, lors de catastrophes, que les acteurs institutionnels et opérationnels ont pu observer ? A quelles réactions ont-ils dû faire face durant leurs interventions ?
- Ont-ils observé des changements d'états comportementaux des populations au cours de ces situations ?
- Comment les personnes réagissent-elles sur le terrain lors de la simulation d'une catastrophe soudaine, et en laboratoire, en situation d'immersion par réalité virtuelle (un tsunami à Nice et une explosion industrielle au Havre) ?

Figure 48 – Une diversité d'approches d'observation (Réalisation : D. Provitolo pour la recherche Com2SiCa, 2019)



Les objectifs sont multiples. Il s'agira de :

- valider et enrichir la typologie des comportements humains préalablement construite (cf. chapitre 6) grâce aux observations de professionnels, de dires d'experts,
- comparer, pour différents types d'évènements et de territoires d'impact, le panel de réactions humaines adoptées,
- considérer les séquences comportementales,
- obtenir des mesures physiologiques du stress,

- identifier et cartographier les trajectoires de déplacement associées à des décisions spontanées d'auto-évacuation.

Les données qualitatives, quantitatives et spatiales issues de ces différents exercices d'observation et d'expérimentation permettront, en outre, d'affiner les modèles mathématiques élaborés pour comprendre les dynamiques spatio-temporelles des comportements humains (c'est-à-dire leur séquençage, leur diffusion dans le temps et l'espace, le rôle des variables de contrôle sur ces dynamiques) et de les calibrer (cf. partie 4).

9.1.1. La mise en situation des professionnels de terrain et des populations face aux risques de catastrophes soudaines et imprévues

Pour répondre à ces questions, deux actions majeures de recherche seront réalisées à court et moyen terme, à savoir, d'une part, la mise en place et la réalisation de focus groupes auprès des acteurs institutionnels et opérationnels, et d'autre part l'élaboration d'enquêtes innovantes basées sur « l'immersion » des populations sur le terrain et en laboratoire.

9.1.1.1. La réalisation des focus groupes avec les acteurs institutionnels et les professionnels de terrain

Nous avons d'ores et déjà quelques résultats préliminaires, les enquêtes qualitatives sous la forme de trois focus groupes³⁰ ayant été réalisées avec les acteurs opérationnels de Nice : au total douze acteurs représentant les différentes sphères d'intervention sur le terrain (Préfecture des Alpes-Maritimes, Direction Départementale des Territoires et de la Mer 06, Métropole Nice Côte d'Azur, Service d'Incendie et de Secours des Alpes-Maritimes, Médecins urgentistes, Agence Régionale de la Santé, Centre Communal d'Action Sociale, Police municipale, Police Nationale). Les focus groupes devront également être réalisés sur le terrain havrais pour pouvoir ensuite comparer les résultats avec ceux de Nice.

A. Le protocole d'enquête et le guide d'entretien et d'animation

En amont des rencontres avec les trois focus groupes (même groupe de travail tout au long des échanges), j'ai d'abord élaboré avec ma collègue géographe A. Tricot un protocole d'enquêtes, un guide d'entretiens et une grille d'animation pour interagir avec les acteurs.

Ce protocole et ce guide d'entretiens ont été suivis lors des différentes rencontres ayant pour objectifs de coconstruire les savoirs. Leurs analyses permettront :

- d'identifier et comprendre le panel des comportements humains lors de catastrophes : ceux qu'ils ont pu observer, ceux auxquels ils ont du faire face,
- d'explicitier les changements d'états comportementaux au cours de ces situations,
- de construire, grâce à leurs observations de professionnels, de dires d'experts, une typologie des comportements humains lors des catastrophes.

³⁰ Un focus groupe est une technique d'étude qualitative qui consiste à rassembler un petit groupe de personnes, ici les experts de la prévention et de la gestion des catastrophes, pour collecter des données et des informations précises. Le focus groupe est réalisé à l'aide de différentes techniques d'animation de groupe (entretien libre, directif ou semi-directif). Il est généralement réalisé en salle.

Ces focus groupes, qui se sont déroulés sur des journées entières, étaient encadrés par six à huit chercheurs du groupe de recherche Com2SiCa. Nous avions tous des rôles bien définis :

- l'animation du focus groupe,
- l'enregistrement et les prise de notes des échanges,
- les observations des échanges et les interactions dans la salle.

B. Le recueil des données et la méthodologie d'analyse du verbatim

Avec accord des acteurs, l'ensemble des échanges a été enregistré (soit trois fois sept heures d'enregistrement), nécessitant ensuite une retranscription intégrale des données verbales.

Nous avons donc réalisé les verbatim de ces différentes journées de travail afin d'obtenir le compte rendu écrit fournissant le « mot à mot » du débat oral avec l'ensemble des intervenants. Nous avons ainsi obtenu un corpus de cent soixante pages de texte retranscrit. Ces dernières étant à l'état brut, il s'agit de mettre en place la méthodologie permettant de les traiter.

L'analyse des données textuelles peut s'effectuer soit automatiquement avec un logiciel d'analyse textuelle, soit de façon « non automatisée ». Dans un premier temps, cette deuxième solution est retenue, l'objectif étant de ne perdre aucun élément d'information. Il s'agit donc de garder et d'analyser toute la finesse des échanges produits par les entretiens. Cette finesse est difficilement mise en lumière dans le cadre de requêtes automatiques qui n'auraient pas fait l'objet d'une réflexion appuyée sur l'ensemble des questions pouvant être extraites du corpus de données. Cet aspect sera développé ultérieurement, au regard des résultats produits par l'analyse « manuelle », certes plus laborieuse du fait des cent soixante pages de texte à traiter, mais aussi d'une grande richesse. L'analyse du verbatim a été effectuée à « double vue », avec discussion avec les collègues géographes et psychologues sur les éventuels points de divergence.

Au total, il a été repéré dans le corpus constitué, cinq thématiques que nous avons soulignées dans le texte informatisé par des codes couleur (Fig. 49) avec :

- Le panel de comportements humains observés lors de catastrophes,
- Les changements d'états comportementaux,
- Les contextes et les comportements associés,
- Les variables de contrôle : les rôles et missions des professionnels,
- Les types d'évènements.

Figure 49 – L'extraction d'une page de verbatim – Repérage des thèmes à l'aide de code couleur (Réalisation : D. Provitolo et A. Tricot, 2019)

le fait de voir la terre glisser, de voir les lézardes dans le terrain qui s'agrandissent, ils ont pas forcément conscience, et souvent les personnes âgées, les personnes âgées c'est souvent très problématique, les personnes n'ont pas forcément... C'est très difficile quand on est accompagné bien évidemment de la Police municipale voire de la Police Nationale pour faire appliquer les arrêtés, et ça c'est les premières expériences en tant qu'opérationnel sur le terrain. Ensuite, donc au fil des années, donc c'est intéressant de voir l'évolution au niveau de la ville de Nice parce qu'en fait au fil des années, et notamment à partir de 2008, une nouvelle mandature avec une prise de conscience de la gestion des risques, notamment en mettant en place un aménagement, un PC communal au niveau de la ville de Nice, en mettant en place une Réserve communale de sécurité civile, donc qu'on a mis en place en 2010. Et là j'allais dire on a commencé à se structurer pour faire face à des évènements. Il y a eu un évènement déclencheur c'est le black-out de novembre 2008 ou 2009 de mémoire. Il y a eu en fait une rupture électrique sur les Alpes-Maritimes, et là on a pris vraiment conscience de la nécessité de se structurer et de s'organiser, de se coordonner, donc avec la mise en place d'un PC communal, et donc depuis 2010, au fil des années les vigilances météo orange, parce qu'on active le PC, enfin j'allais dire l'organisation de la gestion d'un évènement, je parle pas de la crise, l'organisation de la gestion d'un évènement de sécurité civile elle est à 95% faite pour des vigilances météo orange. C'est le niveau à partir duquel on déclenche systématiquement le PC communal pour coordonner les équipes sur le terrain donc, là, on a connu une grande évolution depuis 2000 parce que justement on était plus sur le terrain, la coordination se faisait surtout sur le terrain, à 2010 jusqu'à aujourd'hui, où là on coordonne depuis le PC communal. ...

On est là pour hiérarchiser et prioriser une intervention parce qu'on est assailli de demandes d'intervention, pompiers, allô mairie, on est en lien avec les adjoints, les administrés, on a des équipes sur le terrain, et on regarde la situation d'intervention, on est là pour essayer de qualifier l'intervention, alors c'est souvent les personnes sur le terrain ont tendance à amplifier souvent, on rencontre souvent ça et on essaye de... Des fois, on nous dit il est tombé tant de m³ sur la route, et quand on se rend sur place c'est pas si problématique que ça, et donc c'est là que c'est difficile la priorisation des interventions, en fonction de la problématique. Et j'en viens justement à un épisode un peu plus tragique. Enfin, pour moi quand on parle de crise on parle de désorganisation. Quand on est organisé, quand on est préparé, quand on sait comment gérer une crue pas majeure, mais une inondation qui est un peu, qui est avérée, on sait à quoi s'attendre. On a des PPR inondation, on sait à peu près quelles sont les zones qui vont être impactées, le PCS justement reprend les zones à risques avec la possibilité de fermer les axes, d'évacuer les populations qui sont dites « sensibles » dans des secteurs, donc ça ça se prépare. On est pas forcément dans l'incertitude, c'est pas pareil.

Cette analyse textuelle réalisée sur l'ensemble des pages du verbatim a également permis d'identifier du contenu non spécifié au départ par le protocole : par exemple, le propre comportement des acteurs dans les situations de crise, les outils ou procédures utilisés pour gérer les situations, les anticipations de crise ou de catastrophe qui aident à réguler quand elles se produisent etc.

Les données textuelles catégorisées dans les cinq thématiques sus-citées seront ensuite extraites et organisées dans des tableurs excels afin de mettre en relation ces thématiques. Cette organisation permettra de répondre à plusieurs questions : Quels comportements (Tab. 7) et changements d'états ont été observés, à quelle(s) échelle(s) (Tabs. 8 et 9), dans quel(s) contexte(s) (Tab. 8) ?

Tableau 7 – L'extraction du panel de comportements observés par les acteurs des focus groupes (Réalisation et traitements en cours : D. Provitolo, A. Tricot, A.H. Boudoukha, 2019)

| Panel de réactions observées | Comportements de panique | Comportements réflexes / instinctifs | Comportements contrôlés / réfléchis | Conditionnements socio-culturels (rajouté par G) | Autres catégories (à préciser) et/ou remarques |
|--|--------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--|--|
| Courir dans tous les sens | FLBG MAD La | D La | | | |
| Attitude Calme | D | D La | FLBG MAD La | | |
| Crier | FLBG MAD La | FLM AD La | F | | |
| Evacuer Calmement | | D* | FLBG MAD La | G | *= si culture du risque |
| Evacuer de façon désordonnée | FLG MAD La | FLBA | D* | | *= quand pas culture du risque |
| Effet tunnel | LD | BALa | MAD La | | |
| Communiquer avec son portable | FLLa | FLBG AD La | FLMALa | G | |
| Eteindre son portable | | | FBGD | | L : non identifié M |
| Immobilisme contraint | G | BM | FLMA | G | D La : non judicieux |
| Immobilisme réfléchi | | | FLBG MAD La | | |
| Comportement attentiste | F | FLBD | M | G | |
| Comportement libératif (un sidéré qui extériorise sa peur) | FLBG MAD | D | | | |
| Recherche des secours | | FGMALa | FLBMAD | | |
| Recherche des proches | | FLGMAD La | FLBMAD | | |
| S'abriter / Se confiner | | F MAD | FLBG MAD La | G | |
| Suivre la foule | FLA | FLBG MAD La | F | G | |
| Entraide | | LG MALa | FLBG MAD | | |
| Le Cristal (leader catalyseur) | A | GM D | FBM D | | L : non identifié La : non judicieux |
| Le Cristal (leader perturbateur) | A | FBGM D | M | | L : non identifié |

1

Tableau 8 – Les mises en relation des contextes et des comportements observés (Réalisation et traitements en cours : D. Provitolo et A. Tricot, 2019)

| Code de l'acteur enquêté | Type Evènement | Comportement individuel ou collectif observé | Contexte environnemental | Contexte humain | Contexte culturel |
|--------------------------|----------------|---|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| C-3 | Ouragan | Bien sûr l'eau et l'alimentation, l'eau ils ne l'avaient pas, | <i>En cours de réalisation</i> | <i>En cours de réalisation</i> | <i>En cours de réalisation</i> |

| | | | | | |
|--|--|---|--------------------------------------|--------------------------------|--|
| | | alors que sur les îles britanniques apparemment ils l'avaient, d'où des mouvements de panique | | | |
| | | | Contexte technologique et médiatique | Contexte spatio-temporel | |
| | | | <i>En cours de réalisation</i> | <i>En cours de réalisation</i> | |

Tableau 9 – Les mises en relation des variables de terrain sur l'observation des comportements (Réalisation et traitements en cours : D. Provitolo et A. Tricot, 2019)

| Code de l'acteur enquêté | Type Evènement | Changements d'états comportementaux | Observations du comportement à l'échelle individuelle (I) ou collective (C) | |
|--------------------------|--|---|---|---|
| C-1 | 14 juillet, c'était après l'attentat (du 14 juillet 2016 à Nice) | Très rarement (Q) des petites crises de nerfs d'un membre de la famille/tout de suite (T) calmés par les autres | I influencé par C | |
| Suite du tableau | | Facteurs générant le changement | La présence d'opérationnels /institutionnels joue-t-elle sur les changements d'état ? | La présence de leaders non institutionnels joue-t-elle sur les changements d'état ? |
| | | Présence d'un petit groupe | Oui | - |
| Suite du tableau | | Quantification des comportements observés : Rarement observés (Ro)/ Fréquemment observés (Fo)/ Systématiquement observés (So) | Durée de chacun de ces états comportementaux | |
| | | Ro | Courte | |

C. Les résultats attendus

Le traitement de l'ensemble de ces données devrait produire trois grands types de résultats :

- **une meilleure compréhension des contextes** (environnemental, culturel, social, humain, sensoriel, spatio-temporel) pouvant avoir une influence sur les comportements humains,
- **une connaissance de l'action des institutionnels et opérationnels** dans la régulation des comportements (il s'agit de variables de contrôle, ces dernières seront intégrées dans les modélisations mathématiques – cf. section 9.2.),
- **la coconstruction d'une nouvelle typologie des comportements humains enrichie par les dires d'experts et validée par nos pairs psychologues.** L'analyse des verbatim issus des focus groupes a permis d'identifier au total près de soixante-cinq comportements type, qu'il conviendra de catégoriser. Une première piste de réflexion consisterait à les organiser selon des réactions illustrant des mouvements (par exemple courir, suivre le mouvement), des émotions (par exemple crier, être en état d'hystérie ou au contraire de calme), des interactions sociales (par exemple l'entraide, la recherche des proches). Cette piste devra être étudiée avec les collègues psychologues.

9.1.1.2. La mise en situation des enquêtés par expérimentation en réalité virtuelle

Il s'agira également de considérer une autre dimension importante dans le cas de comportements en situation de catastrophe : la cognition sociale. La charge émotionnelle (niveau de stress, nervosité, peur, etc.) et sa régulation (la capacité des personnes à contrôler cette charge) seront ainsi désormais prises en compte pour analyser les réactions humaines.

A. Le protocole d'expérience en réalité virtuelle pour explorer les comportements humains

Pour évaluer la charge et la régulation émotionnelles, une immersion par réalité virtuelle menée en laboratoire sera réalisée en partenariat avec les collègues psychologues (pilotes de l'expérimentation), experts du domaine. Cette expérimentation innovante à partir d'avatars permettra :

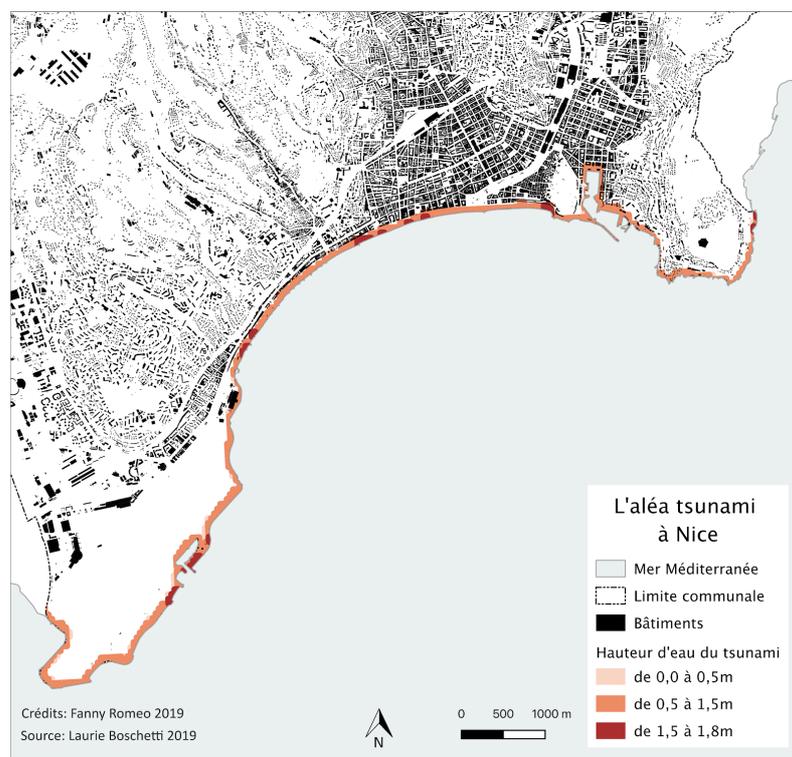
- d'observer le comportement virtuel de l'utilisateur en situation de danger imminent : l'arrivée d'une vague de tsunami sur le terrain niçois d'une part, une explosion d'installation(s) industrielle(s) sur le terrain havrais d'autre part,
- de détecter le moment auquel les utilisateurs réagissent face à ces événements avec des indices physiologiques (stress) et comportementaux,
- de prendre en compte les décisions prises quant au lieu de fuite (sens du déplacement) et le temps mis pour déclencher le comportement de fuite,
- d'évaluer le rôle de l'imitation sur les dynamiques d'évacuation.

L'hypothèse de travail est que la réaction (physiologique, cognitive, émotionnelle et comportementale) face à un tsunami varie en fonction du contexte, des caractéristiques de l'alerte (visuelle, auditive etc.) et des réactions d'autrui.

B. La méthodologie de mise en situation des enquêtés

La mise en place de cette expérimentation a débuté avec l'élaboration d'un environnement virtuel simulant pour l'instant les hauteurs des vagues d'un tsunami au niveau des plages de la Vieux-Nice, selon le modèle géophysique le plus actualisé (Boschetti *et al.*, 2019) (Fig. 50).

Figure 50 – Les emprises et hauteurs d'eau simulées d'un tsunami à Nice (Réalisation : F. Romeo, 2019, coencadrement E. Garbolino et D. Provitolo, d'après L. Boschetti *et al.* 2019)



Cet environnement virtuel a été élaboré par une collègue spécialiste du domaine (Verhulst *et al.*, 2019), testé et amélioré avec l'ensemble de l'équipe.

A partir de cet environnement virtuel, spatial et sonore, des mises en situation sur des échantillons réduits seront réalisées en laboratoire de psychologie (Navarro et Fleury-Bahi, 2019), dans le cadre de travaux de recherche utilisant des protocoles précis liés à la réalité virtuelle. Dans ce domaine, un état de l'art précis devra être réalisé avec nos collègues psychologues.

Figure 51 – L'environnement virtuel construit avec des avatars (Source : E. Verhulst *et al.*, 2019)



Trois conditions seront donc testées en laboratoire de psychologie, avec trente participants par condition :

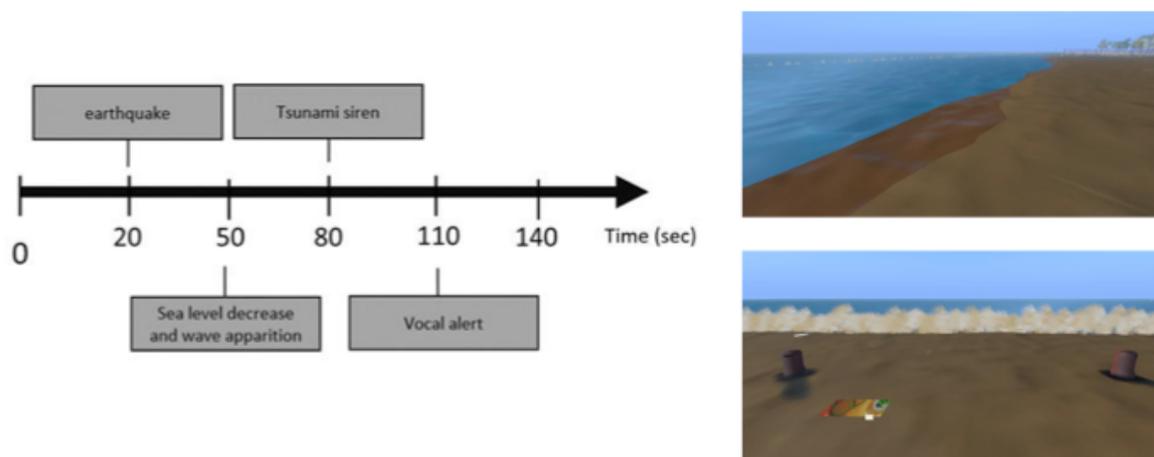
- l'enquêté est immergé seul dans l'environnement virtuel qui simule un tsunami (donc pas d'imitation) : c'est la condition neutre, « contrôle » de l'expérimentation,
- l'enquêté est immergé avec des avatars qui ont un comportement adapté (ils courent ou marchent rapidement vers la bonne direction, sans crier) : c'est la condition ordonnée,
- l'enquêté est immergé avec des avatars qui ont un comportement inadapté (ils courent dans tous les sens, crient) : c'est la condition désordonnée.

Les deux dernières conditions devront être intégrées dans l'environnement virtuel sous forme de possibilités de choix pour pouvoir obtenir des probabilités de suivre ou non les avatars dans les deux conditions expérimentales. Un score d'imitation sera calculé.

Dans chacune des conditions, des signes précurseurs apparaissent avant l'arrivée de la vague. Ainsi, après cinquante secondes d'activité ordinaire dans l'environnement, le niveau de l'eau baisse puis la vague se forme à l'horizon, les bruits de vagues se font plus forts, la

sirène d'alerte est déclenchée à la quatre vingtième seconde, la vague traverse la mer Méditerranée et la plage en trois minutes.

Figure 52 – Le scénario de tsunami virtuel (Source : E. Verhulst *et al.*, 2019)



C. Les résultats attendus

L'expérimentation en laboratoire permettra ainsi d'affiner les résultats en procurant des données sur des mesures implicites (observées) comportementales (décision d'évacuer ou non, à quel moment, par quelles voies, à quelle rapidité etc.), psychosociales (rôle de l'imitation dans les dynamiques d'évacuation) et émotionnelles (évaluation du niveau de stress par électrocardiogramme lors de l'expérience).

La mise au point de ce protocole expérimental sera complétée par les collègues psychologues avec des mesures explicites récoltées par questionnaire en amont (évaluation de l'anxiété, échelle d'impulsivité, inventaire des évènements traumatiques antérieurs), en présentielle et après l'exercice de réalité virtuelle (évaluation de l'état d'anxiété, de la régulation des émotions, de l'imitation etc.) (Boudoukha *et al.*, 2016).

Des données de nature variable seront donc obtenues (physiologiques, comportement virtuel) et viendront alimenter les modélisations mathématiques soit sous l'angle de leurs extensions soit sous celui de leurs calibrations (cf. sections 9.1.2. et 9.2.).

Ces résultats seront complétés par des enquêtes menées sur le terrain.

9.1.1.3. La réalisation d'enquêtes innovantes basées sur « l'immersion » des enquêtés sur le terrain

L'objectif est de saisir les réactions humaines et trajectoires pendant l'évacuation des enquêtés dans l'hypothèse du déroulement d'une catastrophe soudaine et imprévue.

Il s'agit de répondre à la question : « Comment les individus réagissent lorsqu'un évènement brutal survient sans pré alerte ? »

Avec mes collègues, j'ai proposé et articulé différents exercices de simulation conçus sous la forme d'enquêtes de terrain avec deux scénarios de menace :

- un tsunami local sur le réseau anisotropique du littoral azuréen,
- un accident technologique sur le réseau maillé de l'agglomération havraise.

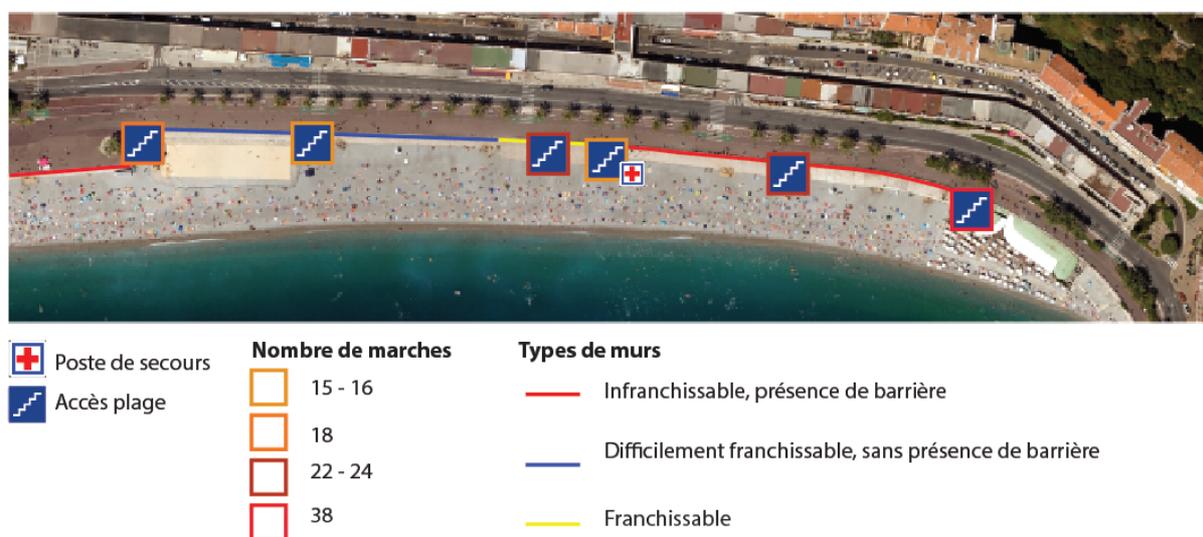
A. Les terrains d'enquête et les scénarios de menace

Le choix de ces terrains n'est pas anodin, il est lié à la fois à leur exposition à ces menaces et à la forme des réseaux. L'un, peu maillé (le littoral azuréen), serait vulnérable dans la mesure où il offre peu d'alternatives en matière de déplacement de la population concernée par l'évènement catastrophique. Il serait donc de nature à favoriser les comportements de panique ou réflexe. L'autre, fortement maillé à larges avenues (Le Havre) ou ayant de nombreuses ruelles étroites (la vieille ville de Nice), offre plusieurs itinéraires alternatifs pour évacuer la zone impactée, il serait donc *a priori* de nature à favoriser davantage le développement de comportements raisonnés.

Nice, un contexte de submersion marine par tsunami

Afin d'analyser les différentes réactions adoptées au regard également du contexte environnemental, j'ai identifié trois zones d'enquête distinctes sur la Promenade des Anglais à Nice (réseau anisotropique). Ces zones sont toutes situées en face de la vieille ville (réseau maillé), du fait de la forte fréquentation des plages attenantes, et ce tant par la population locale que par les touristes. L'objectif est de positionner et immerger l'enquêté sur des plages aux caractéristiques différentes du fait : de la forme des escaliers (linéaire ou en coude), du nombre de marches à gravir en cas de décision d'évacuation, de la présence de murs ou murets franchissables, difficilement franchissables ou infranchissables (Fig. 53). Les murs franchissables joueront certainement un rôle de support d'évacuation dans un mouvement de foule, à une échelle plus importante que celle de l'individu.

Figure 53 – Les zones d'enquête sur le terrain niçois (Réalisation : D. Provitolo et P. Foussekis, 2019)



Le Havre, le scénario d'un accident technologique majeur sur la ville

Deux sites d'enquête ont été retenus en concertation avec la Communauté d'Agglomération havraise (CODAH) : un en milieu ouvert (L'Esplanade de la Plage) et un en milieu semi-fermé (Place basse Oscar Niemeyer (Esplanade du Volcan) (Photo 10).

Cette place basse a pour caractéristique d'être une esplanade semi-fermée pour deux raisons : d'une part, elle est en contrebas des rues qui l'entourent et est donc uniquement accessible soit par des rampes, soit par des escaliers, soit par des parkings souterrains, et d'autre part, elle est encerclée de bâtiments recevant du public (médiathèque, théâtre). Cette comparaison lieu ouvert/lieu semi-fermé a été pensée avec les acteurs de la CODAH. Elle est particulièrement intéressante pour tester si, en milieu fermé avec présence de bâtiments publics alentour, le confinement est un comportement réflexe de la population en cas de catastrophe technologique.

Les résultats d'enquête permettront d'identifier les stratégies de protection : la mise à distance d'avec la source de danger, la recherche d'abri avec ou sans confinement, les trajectoires de fuite.

Photo 10 – L'esplanade de la Mer – milieu ouvert (à gauche) - La place basse Oscar Niemeyer (Esplanade du Volcan) - milieu semi-ouvert (à droite) permettant de tester le confinement (© A. Tricot, 2019)



B. La présentation des protocoles d'enquête

Les protocoles mis en place permettent d'immerger les participants dans une ambiance sonore, d'observer et enregistrer leurs réactions et dynamiques de déplacement sur le terrain, de mesurer sur une échelle qualitative établie par les collègues psychologues la charge émotionnelle de chaque enquête.

Sur ces deux terrains et scénarios de menace, un dispositif combinant des entretiens individuels menés auprès de la population et des immersions visuelles, visant la reconnaissance spatiale des comportements et déplacements a été mis en place. L'immersion visuelle a été réalisée à partir de supports cartographiques tirés sur de grands formats (bâche de 25 m² déroulée au sol) et sur des échelles précises (« enquête Gulliver³¹, Tricot, 2016, 2017 ») (Figs. 54 et 55).

³¹ Dans l'enquête Gulliver, les supports visuels consistent généralement en photographies aériennes tirées à grand format, plus de 20 m², et à une échelle précise au 1/1000^{ème}

Figure 54 – La réalisation de la bache Gulliver – Terrain littoral azuréen (© A. Tricot, D. Provitolo, J. Trévisan, 2019)



Figure 55 – La réalisation de la bache Gulliver – Terrain havrais (© S. Haule et A. Tricot, 2019)



Toujours dans le but d'analyser les réactions et les changements comportementaux face à une situation de crise, la question s'est posée sur la façon de créer le « choc », l'effet surprise, l'élément déclencheur qui va projeter l'enquêté dans une situation d'immersion de catastrophe ? Pour répondre à cette question, il a été choisi de plonger l'enquêté dans une immersion sonore retranscrivant la catastrophe. Cette immersion vise à provoquer chez l'enquêté un changement d'état comportemental : de passer de l'état « normal » à un état « d'alerte », voire d'évacuation. Immersion sonore car le bruit génère également une réaction d'observation vers le stimulus.

Nous présentons ci-après quelques résultats préliminaires sur le déploiement du protocole lors des enquêtes réalisées sur le terrain niçois. Le recueil et l'analyse des données se feront dans un proche avenir.

A Nice, l'immersion sonore a été élaborée en réalisant différentes bandes son séquencées retranscrivant un déroulé de tsunami (Tab. 10). Sur le terrain, le recours à la réalité virtuelle n'est pas possible pour des raisons juridiques et sécuritaires bien compréhensibles.

Tableau 10 – La réalisation de la bande son *Tsunami* (Montage : A. Tricot et D. Provitolo, 2018 à partir des sources brutes : www.universal-soundbank.com/)

| Séquence de la bande son | Durée par séquence | Effets | Catégories | Nommé |
|--------------------------|--------------------|------------------------------|-------------|-----------|
| 0-11 | 11 | Bruit de vagues normales | s_vagues | Mer calme |
| 12-1.20 | 68 | Bruit de vagues type tsunami | s_tsunami | Tsunami |
| 1.21-2.08 | 47 | Bruit de sirènes | s_sirènes | Sirènes |
| 2.09-2.38 | 29 | Consigne d'évacuation | s_consignes | Consignes |
| 2.39-2.57 | 18 | Bruit de gens qui crient | s_cris | cris |
| 2.58-3.05 | 8 | Bruit abstrait angoissant | s_cris | cris |

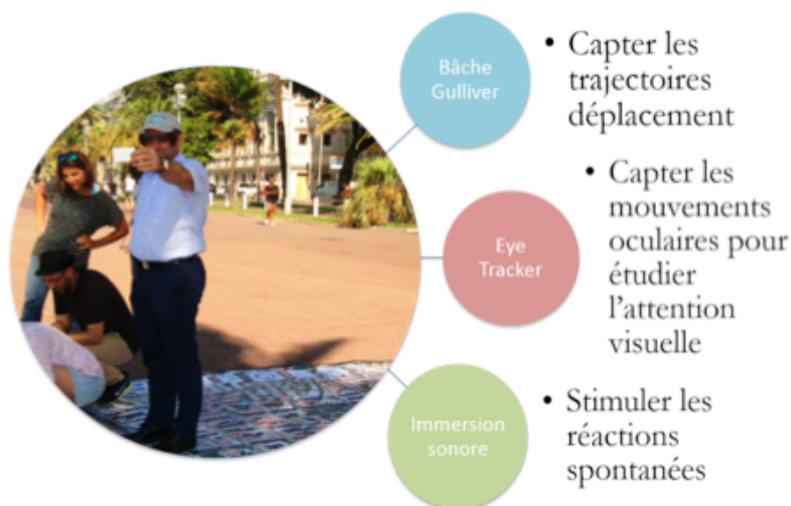
Découpée en plusieurs séquences, la bande son met en avant plusieurs effets. Partant de bruit de vagues « normales », « paisibles », assimilées à une mer calme, la séquence sonore devient de plus en plus stressante avec la retranscription sonore d'un tsunami suivi de sirènes et de consignes d'évacuation. Afin de pousser l'immersion à son maximum, chaque enquêté a été installé sur la plage, à l'endroit de son choix, correspondant généralement à son lieu habituel d'usage. Il s'agissait ainsi de reproduire au mieux les conditions dans lesquelles un individu, selon ses habitudes, se comporte à la plage. De ce fait, suivant l'enquêté, celui-ci va adopter une réaction durant la simulation, qui fera l'objet d'un enregistrement vidéo par Go Pro pour analyser la dynamique des évacuations.

Ces supports visuels (bâche Gulliver) et sonores sont ensuite articulés à des oculomètres ou « eye-tracking »³² (Balzarini, 2013 ; Balzarini et Murat, 2016) qui permettent de capter les mouvements oculaires pour étudier l'attention visuelle et stimuler les réactions spontanées, d'enregistrer toute la scène du point de vue de l'enquêté, ses commentaires, ses trajectoires et rythmes de déplacement pour évacuer les lieux.

L'ensemble de ce protocole articulant Bâche Gulliver – Eye Trackers - Immersion sonore – Gopro est en ce sens résolument novateur. Il permet d'associer géographes, psychologues et mathématiciens pour mieux comprendre les perceptions des risques (de tsunamis, de terrorisme et industriels), les niveaux de stress en cas de survenue brutale de l'un de ces événements ainsi que les trajectoires spatiales envisagées en cas de fuite et les obstacles nuisant à ces trajectoires.

³² Il s'agit d'un ensemble de techniques permettant d'enregistrer les mouvements oculaires et l'ensemble des déplacements

Figure 56 – L'élaboration du protocole d'enquête sur la Promenade des Anglais
(Source : D. Provitolo, A. Tricot - Com2SiCa, 2019)



C. La méthode d'enquête

Le déroulement de l'enquête à Nice sur la Promenade des Anglais est présenté ci-après et constitue un résultat préliminaire. Le travail reste à réaliser sur le terrain havrais pour lequel une adaptation du protocole a été réalisée.

D'une durée de 45 minutes par enquêté, l'enquête est structurée autour de quatre thématiques avec :

- une discussion sur les usages de la plage : bord de mer, centre ville,
- une observation sur la bâche Gulliver afin de dessiner les chemins empruntés pour rejoindre ces lieux d'usage,
- une observation des comportements et des trajectoires de déplacement à partir d'une immersion sonore et de l'enregistrement de la scène : tsunami à Nice, accident technologique au Havre,
- un debriefing pour évaluer les stress et revenir sur les parcours d'évacuation.

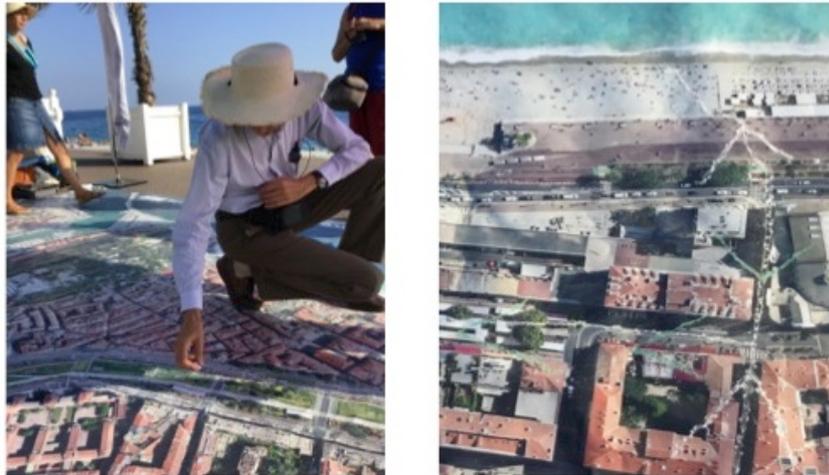
Phase 1 - Les usages de la plage et le tracé, sur la bâche Gulliver, des chemins empruntés pour se rendre à la plage

Durant cette phase, l'échange porte sur l'usage du lieu, les routes empruntées par l'enquêté et les moyens de locomotions afin de se rendre à la plage. L'objectif est de savoir si l'individu a tendance à venir seul ou accompagné, avec quels moyens de locomotion (voiture, bus vélo, tramway, vélo...), à quelle période et à quel moment de la journée. Chaque enquêté retranscrit son tracé des déplacements habituels à la craie sur la bâche Gulliver (Photo 11). Il indique également les escaliers empruntés pour descendre sur la plage, mais aussi l'endroit où il s'installe (plutôt le bord de l'eau, plus vers le centre de la plage ou bien plus reculé vers le mur). Le chemin du retour est-il différent de celui de l'arrivée ? L'ensemble de ces éléments devra ensuite être comparé avec les trajectoires d'évacuation prises sous le stress et répondre à certaines questions : si la personne vient avec un moyen de locomotion, cherche-t-elle à le récupérer et partir avec ou quitte-t-elle

les lieux à pied ? emprunte-t-elle le même parcours que celui du quotidien pour réaliser son auto-évacuation ?

En parallèle, les enquêteurs se chargent de retranscrire les parcours sur les tablettes informatiques pour pouvoir ensuite traiter au laboratoire l'ensemble de ces données dans un Système d'Information Géographique.

Photo 11 – Un enquêté dessine les trajectoires de déplacement habituel pour rejoindre la plage (© D. Provitolo, 2018)



Phase 2 – La simulation d'évacuation en cas de tsunami

La deuxième phase de l'enquête a consisté à équiper l'enquêté d'eye tracker portable type lunettes, de l'accompagner sur son lieu d'usage de la plage et de l'y installer selon ses préférences et habitudes (Photo 12). L'analyse de l'attention visuelle permettra à l'équipe du programme Com2SiCa d'enrichir les modèles cognitifs qui décrivent et prédisent comment l'être humain se comporte et raisonne dans l'espace (Kiefer *et al.* 2017). Dans ce contexte, notre étude s'inscrit dans les cadres théoriques et méthodologiques de la recherche en géovisualisation et facteurs humains (Montello, 2002). L'acquisition de l'information spatiale se réalise essentiellement à travers la vision et l'eye-tracking permet de mesurer où, quand et pour combien de temps le regard humain se pose pour capter et traiter une information spatiale. L'étude proposée participera à une meilleure compréhension des choix d'itinéraire et des repères en condition de stress dans l'environnement réel.

Préparation de l'enquêté : une fois installé sur la plage, assis sur une serviette, l'enquêté est également équipé d'un casque audio avec l'enregistrement de la bande sonore.

Photo 12 – L'installation de l'enquêté sur le terrain (© D. Provitolo, 2018)



Le collègue qui mène l'entretien lui rappelle qu'il sera exposé à une situation de stress, qu'il peut faire arrêter à tout moment. L'enquêteur lui demande de se comporter, à l'écoute de la bande son, comme s'il était dans cette situation (seul ou en famille). Le démarrage de la bande sonore au signal « top » avertit les enquêteurs que la simulation a commencé. Durant cette phase, l'enquêté est en « totale liberté », autonomie. On le laisse réagir comme il le souhaite sans l'influencer. A aucun moment, l'enquêteur ne demande ou suggère à l'enquêté d'évacuer la plage, de fuir les lieux. Certains le feront, spontanément, sans hésiter (Photo 13).

Photo 13 – Un enquêté prend la fuite en courant (© D. Provitolo, 2018)



Phase 3 – Le debriefing avec les enquêtés et l'auto-évaluation du niveau de stress

Une fois de retour sur la Promenade des Anglais et au le stand de l'enquête, le debriefing avec l'enquêté est réalisé. L'objectif est de discuter sur le ressenti de l'immersion et sur les parcours de déplacement : description du chemin emprunté, pourquoi celui-ci, pourquoi ces escaliers...? quelles sont les raisons qui ont poussé l'enquêté à prendre cet itinéraire plutôt qu'un autre : par exemple, pour des raisons topographiques (obstacles...) ou bien psychologiques (certitude, habitudes...). Ensuite, l'enquêté réalise une auto-évaluation de son niveau de stress sur une échelle de 0 à 10 établie par les collègues psychologues avec : 0 représentant un état zen et 10 le stress maximal. Certains enquêtés ont fait le lien entre

la simulation et un évènement traumatisant vécu (à Nice l'attentat du 14 juillet 2016 a été souvent évoqué).

Enfin, quelques informations sur le profil des enquêtés sont recueillies à la fin de l'enquête pour réaliser des traitements statistiques à partir de leur âge, de leur catégorie socioprofessionnelle et quartier d'habitation.

D. Le recueil de données et les méthodes de traitement

Malgré leur complexité logistique – couplant plusieurs outils de recueil de données quantitatives et qualitatives –, ces enquêtes sur Nice et Le Havre permettent de former un important corpus de données qui seront analysées et dont certaines composeront la modélisation mathématique. Les enquêtes auprès de la population ont d'ores et déjà été réalisées, chacune sur quatre journées : au mois de septembre 2018 à Nice et au mois de mai 2019 au Havre. Chaque entretien individuel dure entre quarante-cinq minutes et une heure, ce qui totalise soixante personnes enquêtées sur les deux terrains pendant quatre jours.

Les données brutes récoltées sont de différentes natures avec : des enregistrements vidéo de toute la scène, des enregistrements audio de l'ensemble des échanges menés entre enquêtés et enquêteurs, des photos, des données spatiales, des données temporelles et relatives aux mouvements visuels.

Ces données devront être synchronisées pour être analysées. Par exemple, concernant les données spatialisées, elles découlent soit directement des trajectoires dessinées sur la bâche Gulliver, soit indirectement des données audio et vidéo recueillies. Le recueil et le traitement de ces données permettront de reconstituer le chemin emprunté pour évacuer la plage (quelles trajectoires, à quel moment de la bande son a lieu le changement de comportement, à quelle vitesse l'enquêté quitte la plage, par quel escalier ou muret ?).

On obtiendra ainsi un tableau (Tab. 11) comme suit pour chaque enquêté (codé), avec par exemple :

Tableau 11 – L'extraction des données synchronisées (Réalisation : P. Foussekis et D. Provitolo, 2019)

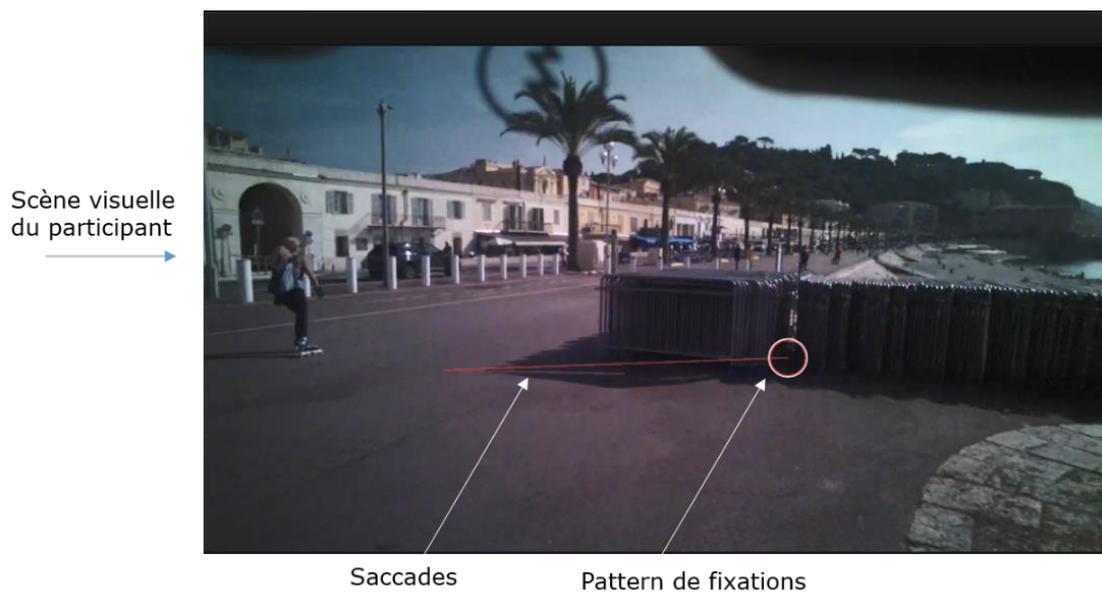
| Enquêté | Lieu de détente | Trajectoires habituelles | Moment où l'enquêté se lève et quitte la plage (min) | Etat d'alerte | Attention visuelle | Prend la fuite en courant ou en marche rapide | Trajectoire déclarée |
|---------|-----------------------|--------------------------|--|---------------|--------------------|---|----------------------|
| J07 | Proche du bord de mer | Identique | 2,23 Consignes | Oui | Balayage plage | Courant | Rentre chez-lui |

L'ensemble de ces informations sera cartographiée afin de produire une « carto-fiche » pour chacun des enquêtés. Cette représentation cartographique a comme objectif d'illustrer les différentes réactions et changements d'états comportementaux des enquêtés ainsi que leurs trajectoires d'auto-évacuation, ou non, lors de l'écoute de l'immersion sonore. Elles sont en cours de traitement en ce qui concerne Nice et permettront

d'aboutir à une cartographie aux échelles individuelles et collectives des accès empruntés pour évacuer la zone (cf. section 9.2., Fig. 66). Pour ce qui est du terrain havrais, tout le travail de récolte des données brutes et de leur traitement se fera dans les prochaines années.

Concernant la collecte et le traitement des données eyes tracker, ils sont entièrement réalisés par une collègue de l'INRIA, R. Balzarini, spécialiste du domaine (Balzarini, 2013). Le recueil des données s'effectue en faisant porter des lunettes aux participants de l'étude, durant la tâche ou l'activité demandée par le protocole. La première étape consiste à équiper le participant en positionnant confortablement les lunettes, la deuxième à calibrer le regard du participant, c'est-à-dire, régler la mesure de convergence des yeux du participant, propre à chaque personne. Lorsque la calibration est validée, l'enregistrement des mouvements oculaires peut être réalisé et suivi à partir du logiciel de contrôle. L'enregistrement correspond à une vidéo, prise par la caméra des lunettes, qui présente la scène visuelle (vue) du participant, et les points de fixation sur la scène (Fig. 57).

Figure 57 – L'extrait d'une vidéo correspondant à un enregistrement d'eye-tracking. La scène visuelle et les mouvements oculaires : la ligne rouge indique la saccade et le cercle rouge indique la fixation (Source : R. Balzarini pour la recherche Com2SiCa, 2019)



Ce traitement des données doit se faire dans un cadre méthodologique précis. Il s'agira :

- de réaliser des mesures « classiques » sur les objets regardés selon les séquences des terrains d'étude (Fig. 58).

Figure 58 – La campagne d'enquêtes eye-tracking à Nice - Heat map d'un enquêté lors de la phase de fuite de la plage (R. Balzarini pour la recherche Com2SiCa, 2019)

Légende : en rouge, plus forte intensité du nombre de fixations, en vert plus faible intensité du nombre de fixations



- de synchroniser les données spatiales, audiovisuelles et sonores pour mettre en relation les scènes terrain avec les séquences de la bande son (qui provoquent une charge émotionnelle) et avec ce qui se passe : au niveau du regard (quels sont les objets regardés, pendant combien de temps... ?), au niveau des changements d'états comportementaux (assis > debout > en fuite) et des trajectoires d'évacuation (Tab. 12).

Tableau 12 – L'extrait d'une grille d'analyse qui présente l'articulation et la combinaison des informations issues de la bande son, de la bande vidéo, des observations comportementales et du traçage du regard (Réalisation : R. Balzarini, D. Provitolo, A. Tricot)

| | Démarrage du Top dans la vidéo | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------------------------------|----------------|--------------------------|----------------|-----------------------|---------|------------------|------------------------|-----------------------|-------------|--------------------|--------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Correspondance séquences bande son et Durée de la séquence en ss | s_vagues 17" | | s_tsunami 58" | | | | s_sirènes 47" | | | | s_consignes 23" | | s_cris 25" | | | |
| Déroulement théorique de la bande son | 6'54" | | 7'08" - 7'08" | | 8'10" - 8'10" | | | 9'08" - 9'08" | | | | 9'28" - 9'28" | | | | |
| Déroulement des intervalles des scènes visuelles avec fixations capturées (codées sur le snapshot) | 3" | 6'57" | sc7_plagemerEst 7'06" | 7'06" | sc7_plagemer 8'23" | 8'23" | 6" | 8'29" | sc7_plagenur 8'50" | 10" | 9" | 9'08" | sc7_promenade 9'22" | 9'22" | sc7_promenade_cris 9'29" | 25" |
| Comportement observé (par la vidéo) | | assis | | assis | | se lève | | marche vite | | marche vite | | court | | court | | (vers les enquêteurs) |
| Les 2 Objets les plus regardés = ADI | | Personnes, Mer | | Personnes, Mer | | | | Mur, Galets, Structure | | | | Palmeirs, Chaussée | | MontéduChateau, Palmeirs | | |
| Les Object(s) identifi(s) par l'ET mais pouvant pas être codés sur un snapshot pas ADI | | | | | | | | | | Escalier | | | | | | |

Cette étude présente des limites d'ordre technique. Elles concernent les spécificités de l'outil de capture de données visuelles (les lunettes Tobii Glasses) dont le système de traçage est basé sur le contraste clair/foncé de la pupille. Du fait de la luminosité trop intense et de la réverbération avec la mer Méditerranée, l'outil n'a pas toujours réussi à enregistrer toute les scènes des participants.

Pour remédier à ces limites, nous avons testé un autre protocole sur le Havre avec l'utilisation de montres connectées pour enregistrer les trajectoires de déplacement et d'oxymètres pour enregistrer le rythme cardiaque (Photo 14) et évaluer le niveau de stress. Des données compliquées à manipuler qu'il faudra recueillir, synchroniser et analyser dans les années à venir !

Photo 14 – L'équipement d'un enquêté (© V. Lanza, 2019)



Ces enquêtes nécessitent un support logistique important. L'équipe Com2SiCa, toutes disciplines confondues, s'est pleinement investie tant dans l'élaboration du protocole que dans le déroulement de l'enquête sur les deux terrains, embarquant même les étudiants de l'IUT du Havre – Technique de commercialisation - et leurs professeurs (N. Verdière et M. Millemi), pour l'enregistrement par caméra de l'ensemble de l'enquête, la prise de son, la retranscription des parcours dessinés sur la bâche Gulliver, la gestion des badauds etc. Une aide précieuse pour assurer le bon déroulement du protocole (Photo 15).

Photo 15 – L'équipe Com2SiCa avec les étudiants lors des enquêtes au Havre, mai 2019 (© D. Provitolo, 2019)



E. Les résultats attendus

Le traitement des données issues de ces enquêtes multisites permettra :

- d'affiner la connaissance sur les comportements humains adoptés lors de catastrophes soudaines, imprévues et à dynamique rapide,
- d'identifier le rôle des canaux d'information (sirène, consigne d'évacuation) sur les changements d'états comportementaux,

- de fournir des données quantitatives, qualitatives et spatialisées aux modélisations mathématiques des dynamiques spatio-temporelles des réactions humaines. Les enquêtes permettront de calibrer les modèles sur les données (qui sont rares) et les valider par estimation des paramètres (cf. section 9.1.2.).

Pour venir compléter les travaux d'observation qui fourniront des connaissances satisfaisantes sur les causes, les facteurs ou les forces qui contrôlent l'évolution des réactions, nous aurons recours à la modélisation mathématique pour intégrer la dimension spatiale dans le modèle Com2SiCa - PCR (Paniqué-Réflexe-Contrôlé-) de simulation des comportements humains collectifs.

9.1.2. Les extensions du modèle PCR à partir des résultats d'enquêtes et d'expérimentation

Dans ce programme de recherche, il s'agira également de proposer avec les collègues thématiques et modélisateurs plusieurs extensions du modèle PCR actuel afin d'intégrer :

- **des effets bien connus en géographie des risques**, à savoir les effets de dominos et de mortalité. Le modèle actuel PCR ne prend en compte ni les pertes humaines, ni les enchaînements d'événements, ce qui est improbable lors de catastrophes. Cette première limite pourra être levée, par exemple en ajoutant une variable d'état *Décès* alimentée par les variables de population Paniquée, Contrôlée et Réflexe. De plus, une réflexion sera menée sur les fonctions de contrôle (rôle de l'information transmise par les autorités, présence des acteurs opérationnels sur le terrain) permettant d'agir et de moduler certains états comportementaux,

- **des apports des sciences cognitives qui proposent le concept d'imitation par comparaison sociale pour étudier les comportements**. La psychologie sociale propose une autre approche que celle des neurosciences pour étudier les comportements humains. L'influence sociale jouant un rôle important dans les relations humaines, le comportement humain est souvent régi par l'imitation par comparaison sociale à autrui (Festinger, 1954). On n'imiterait donc pas par effet biologique mais par effet social, par comparaison sociale pour réduire l'incertitude et évaluer sa propre performance (par exemple, si tout le monde fuit autour d'un individu allongé sur la plage, celui-ci va copier la norme sociale et courir avec la foule). Pour remplir le vide de compréhension, les personnes regardent ce que font les autres pour les imiter. Ainsi, c'est souvent le comportement de la majorité qui influence celui de la minorité.

D'un point de vue cognitif, une extension du modèle PCR initialement basé sur le schéma neurophysiologique proposera désormais un modèle de comportement basé sur deux descripteurs :

- la charge émotionnelle (niveau de stress, nervosité, peur, etc.),
- la régulation émotionnelle (la capacité des personnes à contrôler cette charge).

La charge émotionnelle pourrait être considérée dans la modélisation mathématique (cf. section 9.2.) comme une variable que nous tenterons de quantifier à l'aide d'outils spécifiques (immersions par réalité virtuelle, questionnaires, analyses cliniques...), et par captation de données physiologiques sur l'individu (pour peu que les conditions d'étude le permettent), telles que la pulsation cardiaque, le mouvement, la respiration, l'oxymétrie,

etc. (cf. sections 9.1.1.2. et 9.1.1.3). Pour donner un exemple d'utilisation de ce descripteur, les comportements de panique sont caractérisés par une forte charge émotionnelle et une faible régulation émotionnelle.

Il faudra donc bien poser avec les collègues psychologues ces notions de charge et régulation émotionnelles et intégrer leurs apports et intérêts dans le domaine de la compréhension des comportements humains lors de catastrophe. Il s'agira ainsi d'apporter des réponses à plusieurs questions : quelles modifications apporter à la typologie des comportements humains structurée sur un schéma neurophysiologique (Fig. 19) ? et en quoi l'évolution thématique de la réflexion, basée sur le concept de comparaison sociale, amènera à proposer de nouvelles extensions du modèle PCR ? Trois états comportementaux pourraient en effet être désormais distingués :

- l'état d'alerte : les populations en comportements réflexes sont en état d'alerte et en situation d'incertitude. Elles ont une charge émotionnelle faible et une forte régulation émotionnelle. En effet, dans l'évaluation du stress en psychologie, émotionnellement, il y a un moment d'alerte qui peut être très rapide et qui n'est pas un état de stress (Bargh *et al.*, 1996),
- l'état de panique : il regroupe tous les comportements automatiques, non contrôlés, identifiés dans la typologie des comportements humains (Fig. 22), excepté les états d'alerte. Dans cet état, la charge émotionnelle est forte et difficilement régulée,
- l'état de contrôle : la charge émotionnelle est de plus ou moins grande intensité mais elle peut être régulée. Cet état correspondrait aux comportements réfléchis (par exemple la recherche de secours, l'entraide, la fuite, le pillage etc.).

D'autres descripteurs (Tab. 13) peuvent aider à la classification des comportements, notamment leur caractère temporel : la durée supposée de maintien dans le comportement identifié. Ainsi les comportements réflexes sont plutôt associés à des temporalités courtes (phase perceptive qui fait rapidement place à une prise de décision), tandis qu'un comportement de panique ou contrôlé pourra être observé sur des durées plus longues. Il s'agira donc d'identifier de façon systématique le panel de réactions comportementales à l'aide d'une liste de descripteurs dont le croisement des variations permettra de distinguer au mieux les types de comportements selon les trois états comportementaux (alerte/panique/contrôle).

Tableau 13 – Un exemple de descripteurs des comportements humains

| | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|-------------|--------------|
| Avec charge émotionnelle | Sans charge émotionnelle | Avec régulation | Sans Régulation | Durée brève | Durée longue |
|--------------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|-------------|--------------|

D'autres questions devront être abordées en commun. Il conviendra de réaliser un état de l'art plus approfondi sur ce concept polysémique d'imitation. L'imitation en psychologie sociale semble se rapprocher de l'approche de l'imitation comme rationalité en environnement incertain proposée en économie. Pour A. Orléan (1987), « les groupes en situation d'incertitude ont des comportements mimétiques. En effet lorsqu'un individu ne possède aucun critère lui permettant de discriminer entre deux opinions, la rationalité lui

impose d'imiter un tiers. C'est ce que nous appelons l'hypothèse mimétique : l'imitation constitue la rationalité ultime à laquelle ont recours les agents quand ils ne savent rien. (...) ». Ainsi, « (..) en état d'incertitude, dès lors que je n'ai aucune idée sur le phénomène que je cherche à évaluer, copier l'autre ne peut qu'améliorer mes performances. En effet de deux choses l'une, ou l'autre partage mon ignorance et ma position reste alors inchangée, ou il sait quelque chose et en l'imitant j'améliore ma situation. Par exemple, supposons que le feu se déclare brusquement dans une pièce où se trouvent deux portes, l'une conduisant à un couloir sans issue, l'autre débouchant sur une sortie. Je ne sais pas quelle est la bonne porte. Si je vois un individu se précipiter sur une des deux portes, il est alors rationnel de l'imiter dans la mesure où il est possible qu'il ait la bonne information quant à la vraie issue (...) ».

Cet état de l'art permettra d'affiner la formalisation de l'imitation dans les modélisations mathématiques. En quoi le concept d'imitation par comparaison sociale modifie-t-il les fonctions d'imitation biologique $F(r,c)$, $G(r)$, $H(c,p)$ du modèle présenté au chapitre 6 ? Est ce que l'imitation sociale s'oppose systématiquement à l'imitation biologique ? Par exemple, la fuite panique dans un stade est-elle liée à de l'imitation sociale ? ou plutôt à un comportement grégaire, moutonnier ? Ou aux deux ? En quoi les processus d'imitation se distinguent-ils des processus de contagion ? Dans la formalisation actuelle du modèle, le processus d'imitation est modélisé tel que : le plus fort gagne. Dans les futurs développements du modèle spatialisé, ce processus pourra être plus complexe avec, par exemple, des populations imitant des petits groupes jouant un effet leader.

Enfin, comme le précise A. Weinberg (2014), derrière le « conflit de territoire » entre disciplines, ici neurosciences et psychologie sociale, se pose un problème théorique complexe : peut-on concilier l'approche en neurosciences (où sont décrits des phénomènes biologiques qui sont peu reliés à ce qui se passe sur le plan du ressenti) et l'approche en psychologie sociale où le comportement est largement conditionné par les institutions, les contextes sociaux, les interactions interpersonnelles ? La modélisation peut-elle aider à rendre compatible l'apport de ces différentes approches ?

9.2. La modélisation des dynamiques spatio-temporelles des comportements humains et des évacuations dans des conditions d'urgence

Les objectifs

En dirigeant le programme Com2SiCa, mon objectif est d'intégrer dans les modélisations mathématiques un effet qui intéresse les scientifiques, les institutionnels et les aménageurs, celui de l'influence de la configuration spatiale, de l'information et des foules sur les dynamiques d'évacuation vers des zones sécurisée et sur les réactions humaines lors de ces évacuations d'urgence. Les enquêtes fournissant de la connaissance sur les réactions individuelles mais non sur les réactions de foule, elles sont également complétées par des modèles mathématiques. Ces modèles sont d'autant plus nécessaire qu'il n'est pas possible de recréer les conditions réelles d'une évacuation sous l'emprise de la panique, de la désorganisation (ce point est également traité par l'expérimentation en réalité virtuelle). Ces modélisations mathématiques seront, à ma connaissance, les rares à simuler les dynamiques de déplacements des populations auxquelles sont associés les types et modifications de comportements et leur diffusion dans le temps et dans l'espace. Elles seront d'autant plus complexes à réaliser qu'elles s'effectueront dans un

environnement urbain, c'est-à-dire dans des milieux ouverts et étendus, et non en milieu fermé comme le proposent, par exemple, les modèles particuliers de forces sociales de Helbing *et al.* (1995, 2000, 2002).

En milieu urbain, et durant les catastrophes, nous savons peu de choses sur l'impact des configurations spatiales et le rôle de l'information sur les dynamiques comportementales. Pourtant, les dynamiques et les déplacements associés sont certainement guidés par les configurations territoriales (les formes des réseaux de rues, les densités et largeurs des artères, des places etc.) et les alternatives qu'elles offrent notamment en matière d'évacuation, de fuite, et d'accessibilité aux zones refuges. De plus, les comportements évoluent en fonction du degré d'accès à l'information sur la catastrophe, qui peut prendre différentes formes. Elle peut être :

- visuelle : par exemple sur ce qui est en train de se produire, sur la perception des émotions des autres par l'expression des visages (Soussignan, 2011), sur la présence de services d'intervention (résultats des focus groupes Com2SiCa, cf. section 9.1.),
- sonore : par exemple le bruit d'une explosion, les cris, ou la diffusion d'informations officielles ou non officielles par différents canaux : sirène, mégaphone, téléphone, réseau social, radio, télévision, bouche à oreille etc. (résultats des enquêtes Com2SiCa, cf. section 9.1.).

Ces informations peuvent rassurer la population ou au contraire la stresser davantage, voire la paniquer, alors qu'elles sont utilisées pour guider sa réflexion et ses actions.

Enfin, les comportements peuvent aussi être impactés par la densité de la population, les interactions entre les personnes, et la pression de la foule qui fuit en masse une ou plusieurs zones de danger. Cette foule va-t-elle favoriser la contagion comportementale, générer des difficultés d'évacuation, des zones de congestion (Photo 3) ? E. Vermeiren (2007) propose de distinguer les foules de hasard (par exemple celle d'un métro, d'un stade) des foules stables (par exemple, les foules constituées de collègues de travail, d'enseignants et d'écoliers). Dans une foule stable, les exercices préparatoires d'entraînement et de simulation d'évacuation des lieux sont primordiaux pour éviter, anticiper un mouvement généralisé de panique. Dans une foule instable, où les individus ne se connaissent pas et ne se reverront probablement jamais, la présence de leaders, de sapeurs pompiers et de forces de police joue un rôle fondamental pour catalyser ses mouvements et prévenir les réactions de panique lorsque le choc survient. Il s'agit de variables de contrôle que nous intégrerons et testerons dans les modélisations mathématiques.

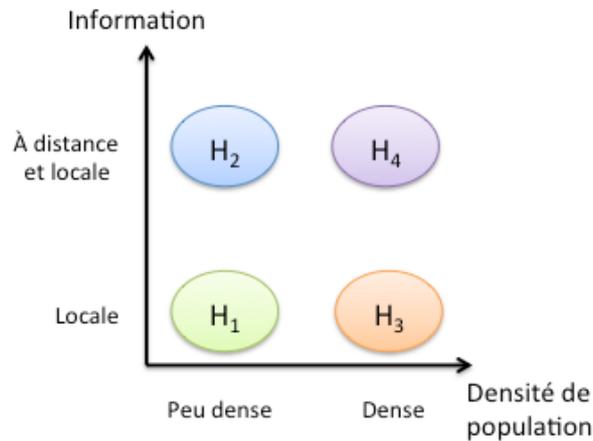
Les questions de recherche et les hypothèses de travail

C'est pourquoi trois questions majeures seront posées pour comprendre les dynamiques comportementales et les dynamiques de déplacement :

- quels sont les impacts des contraintes spatiales sur ces dynamiques ?
- quels sont les effets des informations sur ces dynamiques ?
- quels sont les effets des effectifs de population, de leur densité sur le terrain, voire du type de foule ?

Pour y répondre, quatre hypothèses seront proposées selon deux variables : la densité de population et la transmission de l'information (Fig. 59).

Figure 59 – Quatre hypothèses pour tester le rôle de l'information et de la densité de population sur les dynamiques comportementales



Hypothèse 1 (H₁) : La population est peu dense et la configuration territoriale est suffisamment aérée pour une dynamique d'évacuation sans encombre. L'information sur ce qui est en train de se passer est uniquement locale, c'est-à-dire dans un périmètre restreint. Il n'y a pas de transmission d'information à distance *via* les services d'urgence, les médias, les réseaux sociaux etc. L'imitation comportementale s'effectue donc localement, uniquement au sein d'un lieu. On supposera que les populations se déplacent d'un lieu à un autre, sans possibilité de changer de comportement lors du transfert entre ces lieux. Bien évidemment, quand les populations arrivent à un nouvel endroit, elles se mêlent aux populations déjà présentes. Les populations arrivantes se mélangent donc aux populations présentes.

Hypothèse (H₂) : Elle est identique à l'hypothèse 1, excepté pour la variable information. On supposera qu'en plus de l'information locale, une information est transmise à distance, sur tout ou partie du réseau, soit par un canal visuel (par exemple la perception de la peur sur les expressions des visages, la présence de plusieurs unités d'interventions déployées sur le site ou encore un panneau informatif qui annoncerait l'arrivée imminente d'un événement catastrophique), soit par un canal sonore (par exemple avec le déclenchement d'une sirène d'alerte). La population changera donc d'état comportemental au sein de son nœud du fait de l'information locale et de l'information à distance qui lui est transmise. L'imitation comportementale s'effectue donc localement et à distance. Le déplacement d'un nœud à l'autre se fera donc en tenant compte de ce que font les populations dans les autres nœuds du réseau.

Hypothèse (H₃) : Même hypothèse que H₁, excepté que la foule est dense.

Hypothèse (H₄) : Même hypothèse que H₂, excepté que la foule est dense.

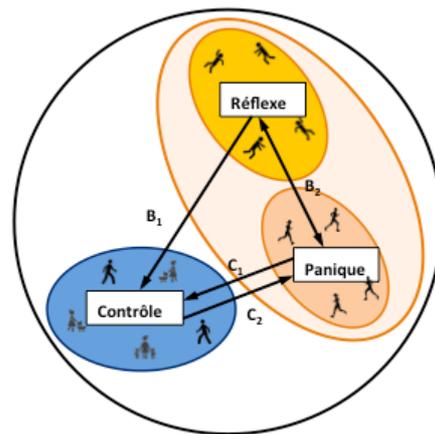
Pour ces différentes hypothèses, les mouvements unidirectionnels (car, par exemple, contraints par la présence d'une barrière naturelle telle que la mer) puis bidirectionnels seront modélisés. Pour les premiers, on supposera que les populations se déplacent d'un

lieu à un autre (par exemple d'une place dangereuse vers une place refuge), dans un seul sens. Pour les seconds, on supposera que les populations peuvent se rencontrer du fait de déplacements bidirectionnels ; ces derniers pouvant être soit plus désordonnés, avec des rumeurs contradictoires sur l'évènement en train de se produire, soit plus ordonnés car certaines directions et sorties sont privilégiées (il s'agit là d'une forme de connaissance de l'espace environnant).

9.2.1. Les directions méthodologiques

Mon objectif est de mener, à moyen et à long terme, les équipes du programme Com2SiCa vers l'exploration de trois directions méthodologiques de plus en plus complexes pour prendre en compte l'influence de la variable spatiale sur les dynamiques comportementales, ci-après représentées schématiquement (Fig. 60). Les modèles proposés permettront de savoir si les endroits de rassemblement des populations en milieu urbain pourront être rapidement évacués vers des zones de sécurité.

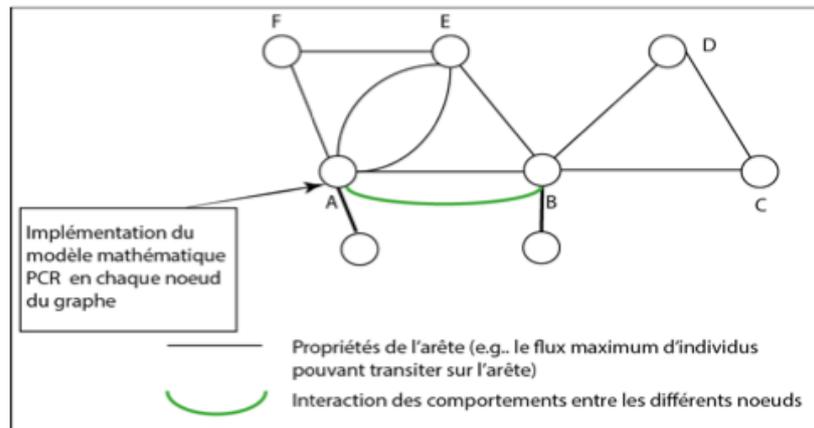
Figure 60 – La représentation schématique du modèle PCR (Source : R. Lozi et D. Provitolo, 2018)



Pour prendre en compte l'influence de la variable spatiale, trois axes de recherche seront privilégiés et pilotés par les collègues mathématiciens.

Le premier axe visera à explorer des méthodologies permettant d'associer la théorie des réseaux complexes à la modélisation par des équations différentielles ordinaires (bulle bleue sur la figure 62 ci-après), afin de considérer un environnement étendu mais « discrétisé ». L'environnement spatial sera modélisé par des réseaux adaptés aux terrains étudiés, les nœuds représentant un lieu doté de propriétés, regroupant un ensemble d'individus soumis au panel de comportements du modèle PCR enrichi (ici noté PCR-EDO), les arêtes symbolisant les axes de communication (routes, ruelles), et les interactions entre nœuds (Fig. 61). Une méthodologie, mixant la théorie des équations différentielles non linéaires et la théorie des réseaux complexes, permettra d'étudier l'impact de la topologie des réseaux et de leur connectivité sur la dynamique de propagation des différents comportements (Corson *et al.* 2012 ; Lanza *et al.* 2012). Enfin, les deux sites de Nice et du Havre permettront d'intégrer les résultats d'enquêtes dans le modèle et de valider les résultats théoriques.

Figure 61 – La schématisation de l'implémentation du modèle PCR – EDO dans un réseau spatial



La deuxième approche consistera à étendre le modèle PCR-EDO à un système d'équations aux dérivées partielles (PCR-EDP) (bulle orange de la figure 62) afin de décrire formellement les dynamiques de diffusion dans le temps et l'espace (Ambrosio *et al.* 2018). L'espace sera modélisé comme un environnement continu (et non plus discret comme avec les EDO), en considérant donc la dynamique spatiale à une échelle plus locale, celle de l'intra-urbain. Il n'y a pas de couplage avec un réseau, car dans l'EDP, la formalisation de l'espace est de façon continue. Dans un système EDP, un des termes à droite du signal égal représente un mouvement, un déplacement dans un espace, comme une diffusion. Ainsi, l'équation logistique ordinaire, qui décrit la croissance d'une population, devient une équation logistique partielle si cette population se diffuse. En langage commun, elle s'écrit : vitesse de variation de P = taux de croissance $\times P$ – diffusion dans l'espace

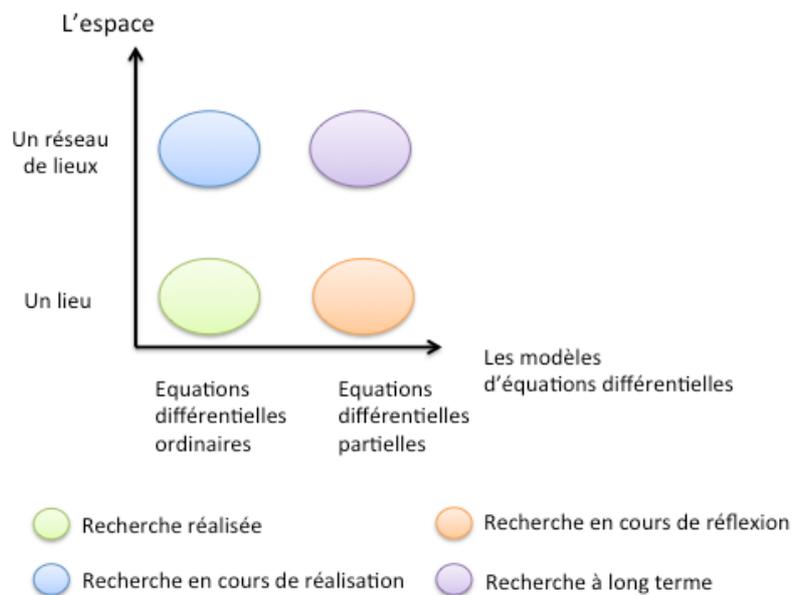
Dans les modèles EDP, généralement, la configuration de l'espace est intégrée de façon relativement simple, il s'agit d'un stade, d'une salle de fête, au sein desquels il y a une sortie d'évacuation. Le modèle PCR-EDP que nous proposerons ambitionne de fonctionner pour une ville et donc pour un espace beaucoup plus vaste et avec des contraintes spatiales plus nombreuses et diversifiées. Il faudra donc identifier les configurations spatiales du terrain qui impactent les mouvements et donc les déplacements dans un espace. Certaines ont d'ores et déjà été identifiées comme les « effets de frontière » liés à la présence de barrières naturelles : je pense ici spécifiquement à la mer Méditerranée qui est à la fois une condition *sine qua non* à la formation d'un tsunami, mais aussi une barrière pour évacuer un lieu. Elle conditionne ainsi une partie des mouvements des populations et donc des trajectoires empruntées. Dans les enquêtes menées auprès de la population sur le risque de tsunami (cf. chapitre 7), aucun enquêté n'a envisagé d'aller à la mer pour s'abriter du tsunami. En revanche, lors des attentats du 14 juillet 2016 à Nice, la mer a fait partie des lieux de refuge. Elle ne joue donc pas systématiquement le rôle de barrière dans les trajectoires d'évacuation. Il s'agira donc d'identifier les configurations territoriales qui impactent le mouvement afin de les intégrer dans les équations.

Une étude de l'état de l'art sur les modèles EDP de dynamique des populations et des foules sera menée par les collègues mathématiciens. En général, en dynamique des

populations (Murray, 1993 ; Witelski, 1997) des termes de diffusion sont considérés, tandis que des équations de type hyperbolique sont proposées dans la modélisation de la dynamique des foules (Maury et Venel, 2011 ; Colombo *et al.*, 2010 ; Villa *et al.*, 2017). Il s'agira donc de relever ce qui les différencie, leurs atouts et leurs inconvénients, afin de décider le(s) cadre(s) théorique(s) le(s) mieux adapté(s) aux terrains de Nice et du Havre.

Enfin, à long terme, il s'agira de coupler le modèle PCR-EDP sur les différents nœuds d'un graphe pour modéliser la diffusion des comportements au sein d'un réseau de quartiers, de villes (bulle violette sur la figure 62 ci-après). Cela permettra de combiner la dynamique des comportements à l'échelle locale (nœuds) et intra-urbaine (diffusion des comportements via les arêtes). Cette approche permettra d'étudier l'impact de la topologie de réseaux et de leur connectivité sur la dynamique de propagation des différents comportements selon les zones observées (Ambrosio *et al.* 2018), ainsi que la synchronisation des comportements entre zones (Zhao *et al.* 2012). De plus, pour introduire des effets aléatoires dans les dynamiques de diffusion spatiale, il sera également possible de décrire des modèles par des équations aux dérivées partielles stochastiques.

Figure 62 – Le croisement de différentes méthodes pour intégrer l'espace dans les modèles



Bien évidemment, ce sont les collègues mathématiciens et informaticiens qui réaliseront les développements mathématiques. Le partenariat entre thématiciens et modélisateurs consiste à formuler les hypothèses de travail, à coconstruire un réseau mathématique de nœuds et d'arêtes à partir d'une réalité terrain, à complexifier les modèles pas à pas, à imaginer des scénarios et analyser les résultats obtenus.

9.2.2. Des résultats préliminaires et attendus

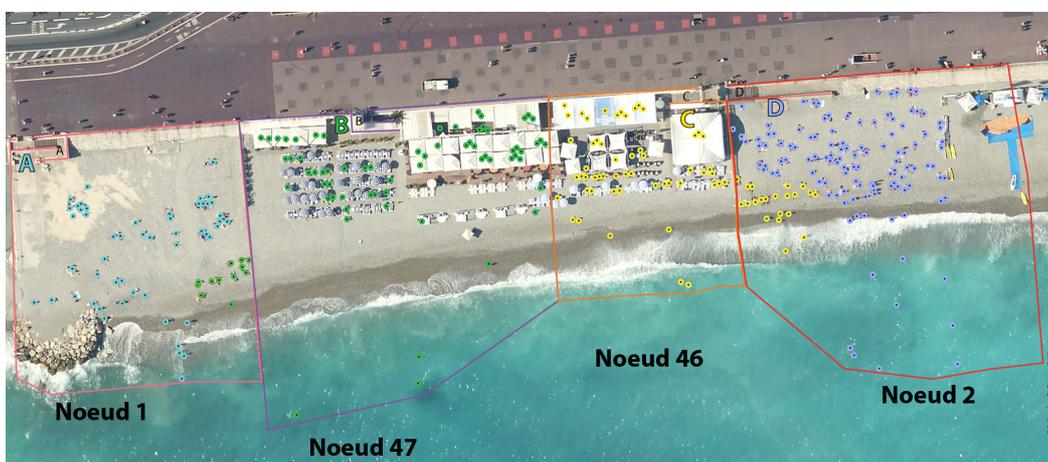
9.2.2.1. La construction d'un réseau mathématique de nœuds et d'arêtes à partir d'une réalité terrain

Pour représenter les dynamiques des comportements dans l'espace, nous mobiliserons donc avec les collègues mathématiciens et informaticiens la théorie des graphes lorsque

l'espace est considéré comme un réseau (bulle bleue et violette, Fig. 62). Cette théorie mathématique est basée sur les notions de nœuds et d'arêtes. Un réseau est une structure constituée d'éléments mis en relation entre eux. Géométriquement, les éléments sont représentés par des nœuds (les sommets) et reliés entre eux par des arêtes (les arcs). Dans chaque nœud, le modèle mathématique PCR sera implémenté.

La question qui se pose, du point de vue géographique, est de savoir ce que représentent un nœud et une arête sur un espace concret (et non abstrait comme dans la théorie). Cette question est moins anodine qu'elle n'y paraît. Prenons l'exemple de l'évacuation d'une plage dont l'accès se fait par des escaliers. Il est relativement aisé de décider que la plage, qu'il convient de fuir, n'est pas un lieu de transit. Elle peut donc être découpée en nœuds au sein desquels se situent les personnes dans les différents états comportementaux (Fig. 63).

Figure 63 – Le lien entre le réseau de nœuds et la réalité spatiale – Application au terrain de Nice (Source : E. Dubos-Paillard pour la recherche Com2SiCa, 2019)



En revanche, les escaliers peuvent être considérés soit comme des arêtes sur lesquelles transitent la population, soit comme des nœuds dotés d'un effectif maximal de population pouvant être supporté sur un espace contraint. C'est cette deuxième solution qui est retenue car elle permettra de prendre en compte le rôle de la taille des nœuds et de leur capacité d'accueil (les escaliers mais aussi les places, les squares, les abris fermés etc.) sur les dynamiques de déplacements.

Chaque nœud correspondra donc à des portions d'espace géographique qui :

- regroupent un ensemble d'individus soumis au panel de comportements du modèle PCR (Réflexe, Paniqué, Contrôlé),
- sont dotées d'une capacité maximale d'accueil, c'est-à-dire d'un effectif maximal de population. Ainsi, dès que la capacité du nœud est atteinte, aucun flux d'entrée supplémentaire de population n'est possible.

Les arêtes relient les nœuds entre eux. Elles symboliseront les axes sur lesquels les déplacements s'effectuent et les relations et interactions entre les nœuds du territoire. Toutes les arêtes ne sont pas équivalentes. Certaines peuvent représenter des ruelles, des chemins avec de nombreux obstacles (Photo 16), d'autres des voies larges. Ces configurations, associées aux densités de population, agiront sur la vitesse de déplacement

ou la distance parcourue entre chaque nœud. Cet aspect pourra être intégré dans la modélisation mathématique, par exemple par le biais d'un coefficient de rugosité associé à l'arête.

Photo 16 – Des obstacles encombrant les ruelles du Vieux-Nice (à gauche) et d'Istanbul (à droite) (© D. Provitolo, 2019)

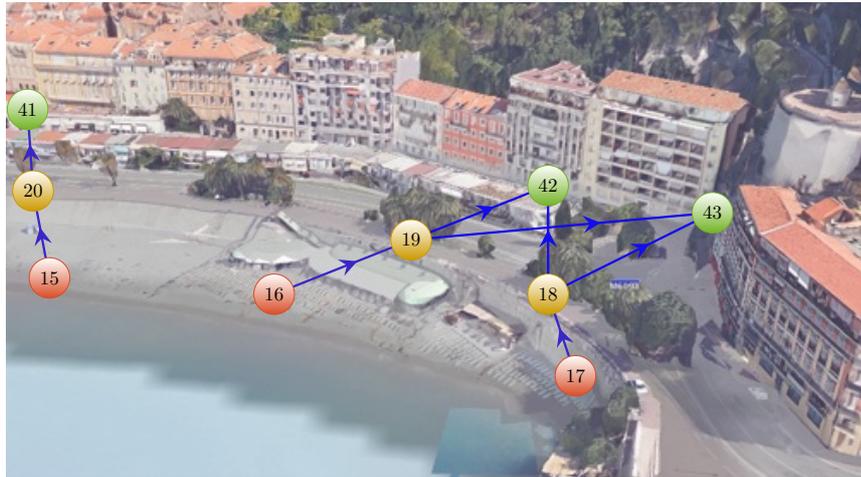


Dans ce programme de recherche, à court terme, des réseaux de graphes simples de trois, quatre nœuds et arêtes seront construits. A plus long terme, l'environnement spatial sera modélisé par des réseaux adaptés aux deux terrains et situations d'enquêtes dont nous avons exposé les protocoles et analyses préliminaires (cf. section 9.1.). Les résultats des enquêtes menées à Nice et Le Havre permettront de construire un réseau non plus fictif mais représentant la configuration spatiale des trajectoires de fuite, d'auto-évacuation des lieux en cas de tsunami sur le littoral azuréen ou d'accident technologique dans l'agglomération havraise.

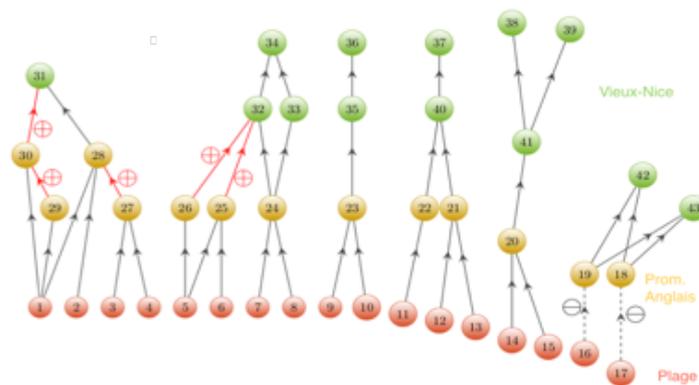
Si je prends l'exemple du risque de tsunami, il s'agira de construire un réseau de nœuds qui distinguera trois zones : la plage, les escaliers permettant d'évacuer la plage et l'espace alentour qui représentera les zones de mise à l'abri. La figure 64 ci-dessous en est une illustration mais n'intègre pas encore les trajectoires et relations entre les nœuds issues des enquêtes. Elle a été réalisée à partir d'un travail de prérepérage réalisé avec Google Earth³³.

³³ Google Earth est un logiciel, propriété de la société Google, permettant une visualisation de la Terre à partir d'un assemblage de photographies aériennes ou satellitaires.

Figure 64 – La construction d'un réseau de nœuds sur la base de la configuration spatiale des plages de Nice (Source : Equipe Com2SiCa)

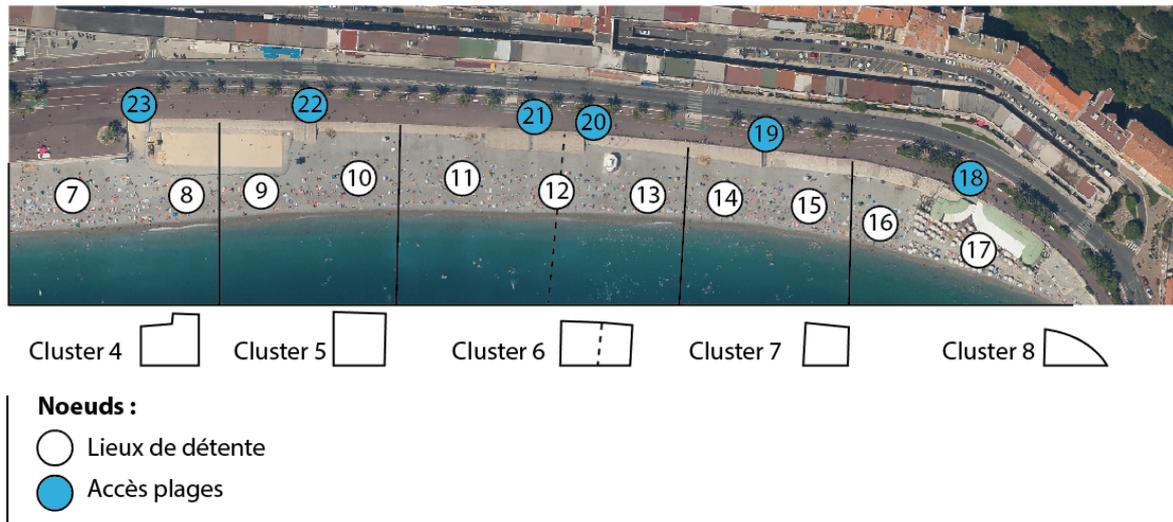


De la plage –formalisée par des nœuds rouges car la zone est directement impactée en cas de submersion- vers l'intérieur du Vieux-Nice –nœuds jaunes et verts-



Dans un travail ultérieur, les nœuds symboliseront spécifiquement les lieux de détente et les accès à la plage empruntés par les différents enquêtés (Fig. 65), tandis que les arêtes représenteront les trajectoires de leur déplacement. Ces trajectoires seront identifiées et cartographiées à partir des traitements des enquêtes qui ont commencé et dont nous pouvons présenter un résultat préliminaire (Fig. 66).

**Figure 65 - La répartition spatiale des clusters sur le terrain d'enquête de Nice
(Réalisation : D. Provitolo, 2019)**



La représentation cartographique des enquêtés (code SC3) correspond à un groupe d'individus composé de deux personnes, un père et sa fille. Ils se rendent habituellement à la plage en empruntant le même chemin à l'aller et au retour. Leur plage habituelle est située à la frontière entre la plage « beau rivage » et le centre sportif « Nikaia Water Sport », ils s'installent plutôt près de la mer. A l'écoute de l'immersion sonore de l'arrivée d'un tsunami simulé, plusieurs réactions ont été observées, enregistrées et filmées :

- tous les deux se lèvent, sans concertation verbale, au moment de l'écoute de la séquence sonore, la sirène. Leur attention visuelle est fixée sur la mer,
- lorsqu'ils prennent la décision de se lever de la serviette de plage, ils quittent la plage immédiatement, ils ne s'arrêtent pas pour regarder ce qui se passe autour d'eux,
- concernant le parcours de fuite, ils quittent tous les deux la plage en marche rapide mais éprouvent à deux reprises un désaccord sur le chemin à prendre. Dans un premier temps, la discorde porte sur le choix des escaliers à emprunter. Dans un deuxième temps, sur le lieu de refuge. Il est possible de noter que l'un souhaite rejoindre la colline du Château (abri en hauteur), tandis que l'autre estime ne pas avoir assez de temps pour la rejoindre et préfère reprendre le chemin habituel. C'est cette deuxième solution d'évacuation qui sera choisie.

Figure 66 - Une « carto-fiche » des réactions d'enquêtés SC3 en contexte de tsunami simulé sur le terrain de Nice (Réalisation : P. Foussekis et D. Provitolo, 2019)



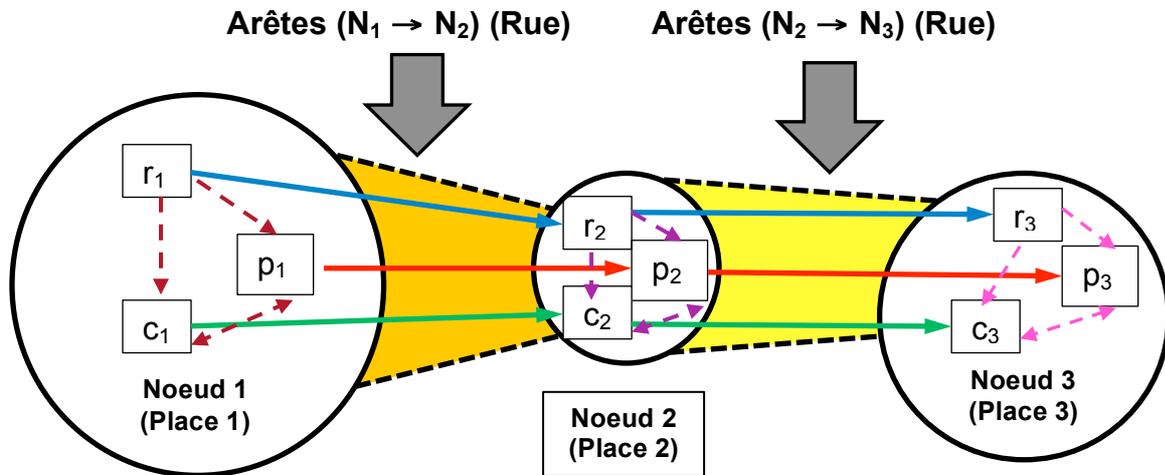
9.2.2.2. L'implémentation des équations différentielles ordinaires sur un réseau de nœuds - Application au risque d'attentat

Dans un premier temps, nous avons considéré seulement le mouvement unidirectionnel de la foule (c'est-à-dire le mouvement sur un graphe orienté) dans un réseau simple de trois nœuds. Sur la figure 67, les arêtes géographiques (c'est-à-dire la rue reliant le nœud 1 au nœud 2 et celle reliant le nœud 2 au nœud 3) sont divisées en trois « arêtes comportementales », ce qui signifie que, dans la même rue, des personnes en comportements réflexe, panique ou contrôlé s'échappent du nœud 1 vers le nœud 2 puis le nœud 3. Nous avons supposé également que les populations ne changent pas de comportement au cours de ce déplacement ; il n'y a donc plus d'imitation. Par conséquent, les personnes de chaque comportement particulier du nœud 1 rencontrent des personnes du même comportement dans le nœud 2. Le couplage entre les nœuds est donc linéaire car il n'y a pas d'interaction entre des populations dans des états comportementaux différents situées sur deux nœuds différents. La figure 67 illustre le cas où il est supposé qu'une attaque terroriste se produise dans le nœud 1 (large place) et que les populations, dans différents états comportementaux, essaient de s'échapper de ce nœud vers les nœuds 2 (place intermédiaire) et 3 (place refuge) (Photo 17 et Fig. 67).

Photo 17 - Barcelone, un exemple de ruelles assurant la connexion entre deux places (© D. Provitolo, 2018)



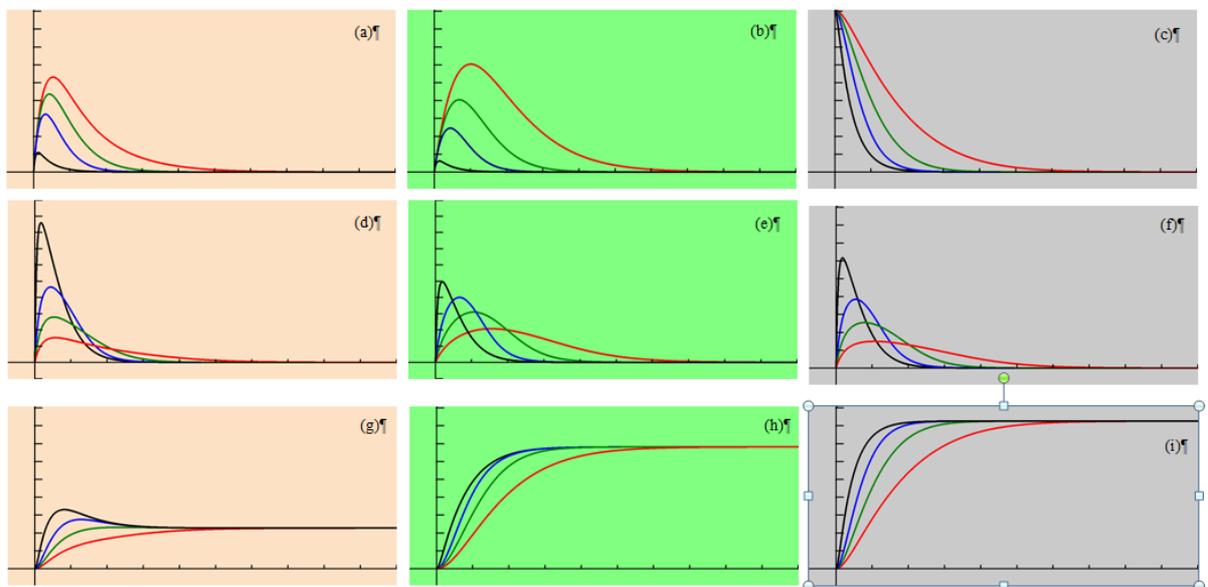
Figure 67 – Un réseau simplifié de trois nœuds associés au modèle PCR (Paniqué-Contrôlé-Réflexe) (Source : D. Provitolo, R. Lozi, E. Tric, 2020a, à paraître)



Les simulations numériques d'évacuation ont permis de montrer que, selon leur taille, des lieux intermédiaires ou des places publiques modulent la dynamique et la vitesse de circulation de la foule lors de son évacuation vers un lieu sûr. Nous l'avons démontré dans les expériences numériques suivantes : avec les mêmes valeurs de paramètre, à l'exception de la taille du nœud 2, nous avons analysé la vitesse à laquelle la place 1 (nœud 1) où a eu lieu l'attentat se vide (Provitolo, Lozi et Tric, 2020a, à paraître) (Fig. 68).

Figure 68 – Des résultats de simulation en fonction de la capacité d'accueil (W) de la place intermédiaire (nœud 2) (Source : D. Provitolo, R. Lozi, E. Tric, 2020a, à paraître)

Légende - $W_2 = 50$ (courbes rouges), $W_2 = 100$ (courbes vertes), $W_2 = 200$ (courbes bleues), $W_2 = 1000$ (courbes noires). La capacité d'accueil du nœud 3 qui assure la sécurité des populations est importante et est fixée à $W_3 = 20500$



Dans le cas où $W_2 = 1000$ (courbes noires), la fuite de toute la population du nœud 1 vers le nœud 2 (qui peut être une petite place, un square) puis vers le nœud 3 est très rapide, sa durée est inférieure à 10 minutes (Figs 68c, f, i). Cela s'explique par le fait que le nœud 3 a une taille suffisante pour accueillir l'ensemble de la population ; il y a donc un afflux massif de personnes paniquées (Fig. 68d), supérieur à celui qui est contrôlé (Fig. 68e), au sein de la place 2, qui se vide très rapidement lorsque la majorité des personnes contrôlées parvient à l'abri sûr (Fig. 68h). Cependant, on peut noter qu'un nombre important de la population est paniqué dans la place qui est une zone de sécurité (nœud 3) et que ce nombre ne diminue que lentement (voir la bosse (Fig. 68g)). Cela s'explique par le fait que la dynamique de fuite, n'est pas entravée par des obstacles ou des goulots d'étranglement, que les populations en fuite n'ont pas assez de temps pour changer leur comportement.

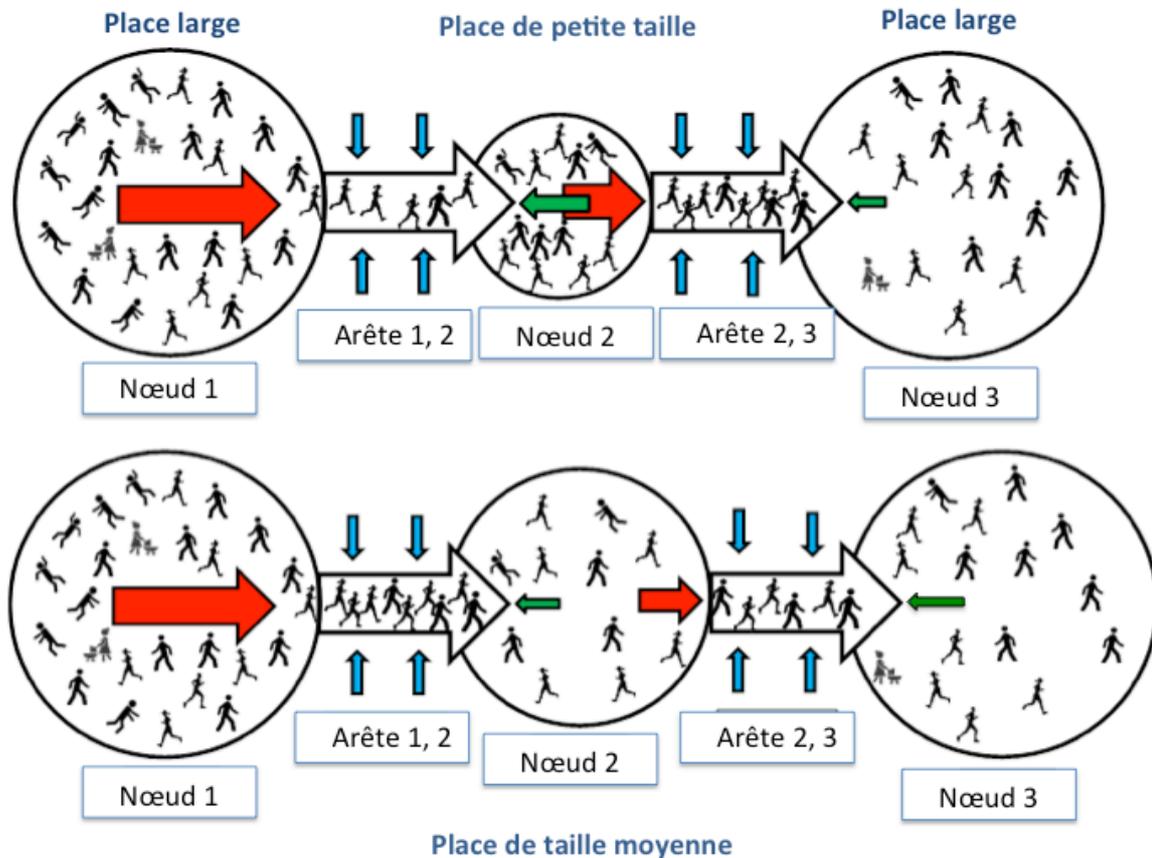
Ces résultats de simulation pourraient paraître surprenants. Mais ils rejoignent les travaux des psychologues menés sur l'intelligence émotionnelle³⁴ (Damasio, 2005). En effet, « ceux qui se laissent guider par leurs émotions prennent sans le savoir des décisions efficaces » (Grewal et Salovey, 2011), ici fuir sous l'emprise de la panique pour rejoindre le plus rapidement possible un lieu sûr.

Par contre, si $W_2 = 50$ (courbes rouges), l'évacuation de la population totale du lieu 1 au lieu 2 puis au lieu 3 est beaucoup plus lente (environ 25 minutes au lieu de moins de 10 minutes, Figs 68c, f, i). La population paniquée a le temps de se calmer à la place 1, car il n'y a pas de nouvelle attaque (on a supposé qu'il n'y avait pas d'effet de dominos, $s_1 = s_2 = 0$). C'est donc une population qui est principalement dans un état de comportement raisonné qui, paradoxalement, arrive à la place 3 (Figs. 68g,h).

Ces premiers résultats seront enrichis par l'intégration de couplages non linéaires entre les populations (Lozi *et al.*, 2016). En effet, lorsque la foule se déplace d'un nœud à un autre, sa vitesse et le mouvement associé dépendent de trois facteurs. Le premier est lié aux caractéristiques topologiques des rues (largeur, étroitesse), laquelle caractéristique sera modélisée par un coefficient de rugosité associé aux arêtes. Le deuxième facteur est lié à la pression de la foule qui va fuir en masse la place où l'attentat a lieu (nœud 1). Il est proportionnel au nombre de personnes présentes dans le premier nœud. Le troisième facteur reflète la contre-pression due à la capacité maximale de la place intermédiaire (nœud 2) conjuguée à la quantité de population déjà présente sur la place. La combinaison de la pression et de la contre-pression peut créer un goulot d'étranglement (Fig. 69) et avoir ainsi un effet sur les dynamiques comportementales. En se gênant mutuellement, les populations risquent ainsi de créer des zones de congestion qui vont impacter les dynamiques d'évacuation et les comportements.

³⁴ L'intelligence émotionnelle est l'ensemble des capacités liées à la reconnaissance et à la gestion des émotions (Grewal et Salovey, 2011).

Figure 69 – Le rôle de la pression et contre-pression sur les dynamiques comportementales (Source : R. Lozi, D. Provitolo, E. Tric, 2019)



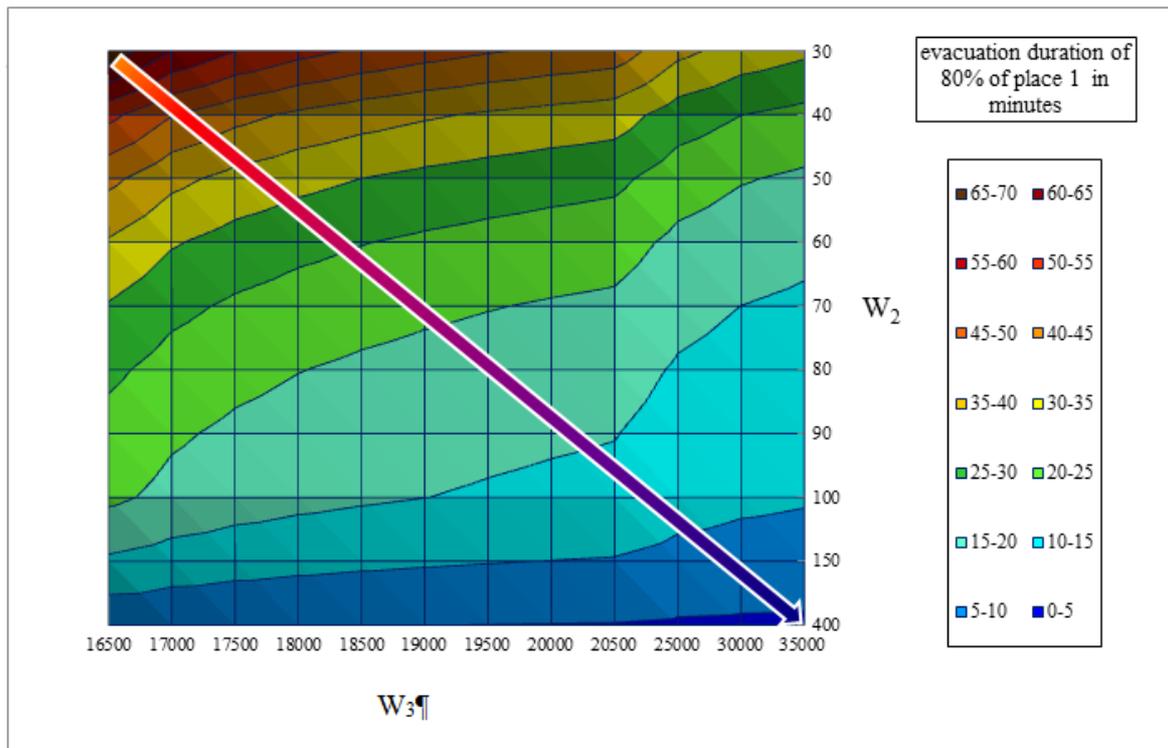
Les algorithmes d'optimisation, tels les algorithmes génétiques (Mitchell, 1998), pourront également être mobilisés dans nos futures recherches pour trouver une solution optimale de configuration d'évacuation d'urgence à l'échelle d'un quartier par exemple, zone constituée d'un réseau de nombreuses places et de rues. Ces algorithmes peuvent permettre, sur le plan de l'aménagement territorial, d'agir sur un système existant (par exemple la taille des places) pour le faire évoluer dans un sens favorable, pour exploiter le chemin d'évacuation le plus court ou le plus rapide.

9.2.2.3. La restitution des résultats des simulations numériques sous une forme cartographique

Avec les collègues mathématiciens et géophysiciens, R. Lozi et E. Tric, nous avons également mis en oeuvre une réflexion pour proposer une représentation graphique facilitant la lecture des résultats de simulations numériques obtenus sous la forme de courbes. Cet aspect est essentiel pour une appropriation de la connaissance par les décideurs publics, cette représentation devant aider les planificateurs à déterminer avec précision où organiser des événements publics dans un contexte territorial spécifique. L'exemple présenté est celui d'une représentation en 3D indiquant le temps mis pour évacuer 80 % de la population présente sur la place 1 en fonction des capacités d'accueil des autres places 2 et 3 (Fig. 70). Pour représenter l'information quantitative (le temps mis pour évacuer), on utilise les règles de la sémiologie graphique où les dimensions ne sont pas géographiques mais liées aux composantes colorées, avec ici les couleurs chaudes

pour révéler des temps élevés d'évacuation, et des couleurs froides pour des temps rapides d'évacuation.

Figure 70 – Les temps d'évacuation du nœud 1 vers le nœud 3 en passant par le nœud 2 (Source : D. Provitolo, R. Lozi, E. Tric, 2020a, à paraître)



9.3. Le développement d'une plate-forme pour l'analyse et la simulation comportementales des populations urbaines en situation de catastrophe

Afin de partager et de tirer des enseignements des modèles construits dans Com2SiCa, je coordonne avec les collègues informaticiens du projet la réalisation d'une plate-forme accessible par le web de simulation des réactions humaines. L'objectif est de rendre les résultats des travaux de modélisation mathématique manipulables par différents utilisateurs.

9.3.1. Les objectifs de la plate-forme

A moyen terme, cette plate-forme sera essentiellement un **outil de recherche** à destination des chercheurs du programme Com2SiCa et des professionnels travaillant sur la question des comportements en situation de crise ou de catastrophe. Sur cette plate-forme, les utilisateurs doivent pouvoir implémenter les différentes extensions des modèles PCR, et réaliser les leurs en testant différents scénarios sur des terrains distincts. L'interaction et le paramétrage du modèle de calcul devront être présentés de façon la plus détaillée et la plus fonctionnelle possible, permettant une grande diversité dans la création des scénarios de simulations.

A plus long terme, cette plate-forme aura également vocation à être un **outil de formation** à destination des professionnels qui auront à prendre des décisions au sein des cellules de crise ou sur le terrain (pompiers, sécurité civile, maire) afin d'amener ces

derniers à tirer des enseignements utiles et à renforcer leurs expertises ; dans cette modalité, un certain nombre d'études de cas typiques seront disponibles sur la base de scénarios et de paramétrages prédéfinis (stockées dans une base de données) de simulations visualisables. Les résultats issus des situations simulées viendront en appui des pratiques. Ils pourront également être utilisés pour améliorer les dispositifs d'alerte existant et venir en appui des actions de culture du risque déployées auprès des populations.

9.3.2. La collaboration entre informaticiens et thématiciens

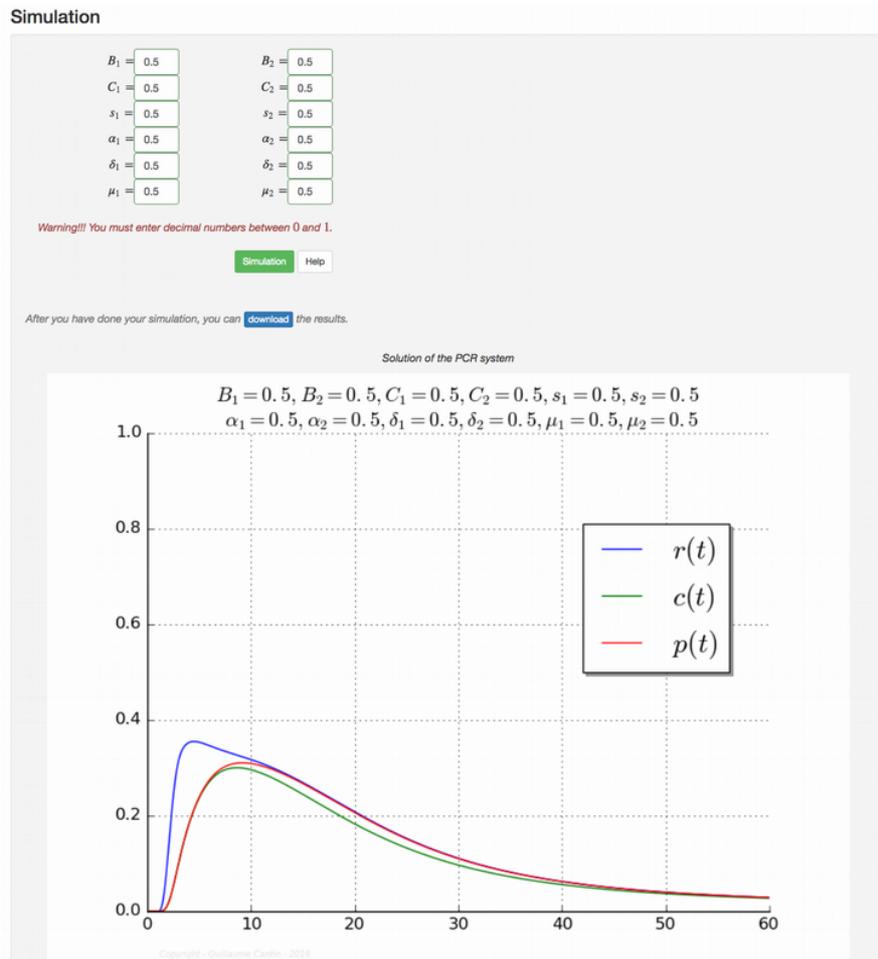
Le développement informatique de la plate-forme sera pleinement assuré par les collègues informaticiens du LITIS (Université du Havre) et les étudiants dans le cadre de stage de Master. La collaboration entre les thématiciens et les informaticiens portera sur l'interface avec i) l'analyse détaillée des besoins fonctionnels de l'outil que l'on souhaite réaliser, ii) la réalisation de l'ergonomie de l'interface de manipulation du modèle mathématique de calcul pour générer des simulations. Il s'agira en particulier de fournir à des utilisateurs non mathématiciens la possibilité de « jouer » avec le modèle sans avoir à en maîtriser tous les paramètres.

La formalisation des besoins se fera à l'aide d'outils de conception tels qu'UML (*Unified Modelling Language*, cf. chapitre 3) qui propose des diagrammes de cas d'utilisation capables de schématiser toutes les modalités d'usage prévues pour l'outil. Cette schématisation est le début du travail de conception informatique. Certains besoins particuliers au niveau de l'interface ont déjà été identifiés :

- visualiser sur carte un site à risque catastrophique donné (accompagné éventuellement d'autres données géographiques),
- avoir la possibilité de définir un réseau de métapopulations directement sur carte,
- manipuler les variables, comme les effectifs de population, le niveau de culture du risque d'une population initiale, ou le type d'évènement catastrophique à considérer (brutal, à dynamique lente, rapide, etc.),
- exécuter et enregistrer la simulation,
- réaliser des simulations à différentes échelles de temps (seconde/minutes/heure/semaine/mois),
- exporter les résultats de simulation sur un ordinateur.

La plate-forme sera donc constituée de différentes pages, notamment une page d'accueil qui comportera les versions graphiques des modèles PCR (modèles a-spatial et spatial) et une page permettant la réalisation des simulations (Fig. 71).

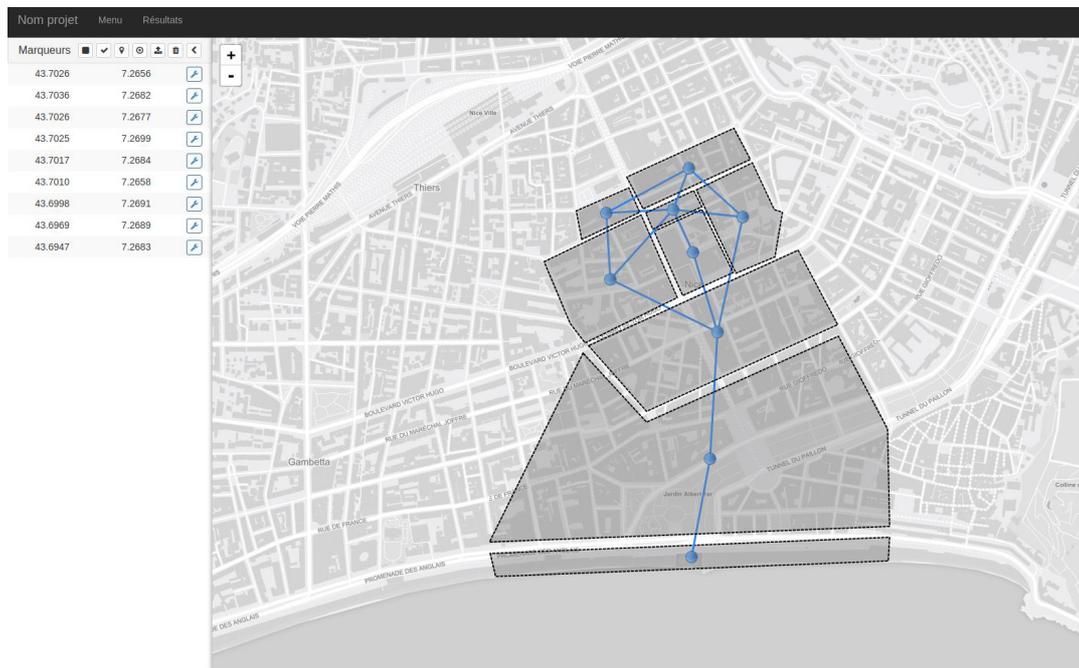
Figure 71 – Le développement de la plate-forme (résultats préliminaires) (Source : L. Jouen, encadrement R. Charrier, 2018)



9.3.3. Un résultat préliminaire : la validation de la notion d'espace auprès des acteurs institutionnels et opérationnels

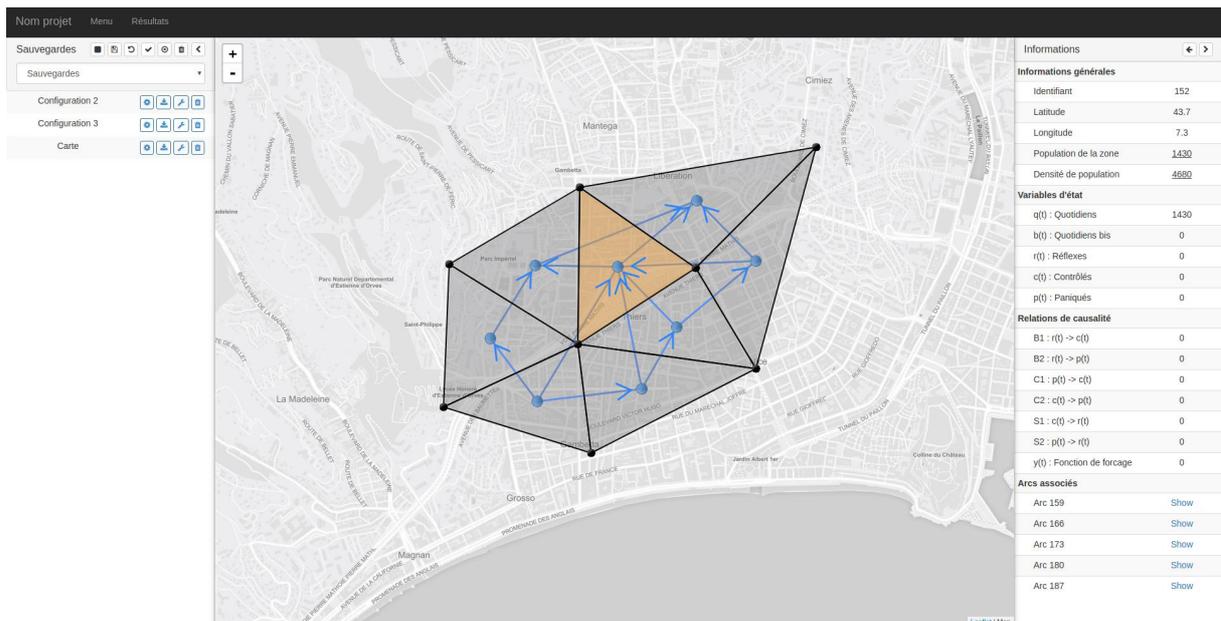
Pour adapter le développement de la plate-forme aux besoins des opérationnels, on doit vérifier que le découpage de l'espace géographique en termes de réseaux (les notions de nœuds et d'arêtes constituent les modèles mathématiques spatialisés) est une configuration spatiale pertinente pour les acteurs, pour qu'ils puissent implémenter le modèle spatialisé dans la plate-forme. L'utilisateur doit en effet pouvoir créer son propre zonage et y définir des nœuds pouvant être reliés entre eux et formant ainsi un réseau (Fig. 72).

Figure 72 - Une capture d'écran de l'interface web représentant un réseau de graphes sur la ville de Nice (résultat préliminaire) (Source : D. Paton, encadrement R. Charrier, 2018)



Ce point est essentiel car l'objectif du programme Com2SiCa pour les acteurs est de les aider à comprendre les dynamiques de déplacements des populations auxquelles ils pourraient être confrontés et à cerner la façon dont les individus se comportent, évoluent dans une situation de catastrophe (Fig. 73).

Figure 73 - Une capture d'écran de l'interface web représentant un réseau de graphes orientés et dynamiques – Application à la ville de Nice (résultat préliminaire) (Source : D. Paton, encadrement R. Charrier, 2018)



| Informations | |
|-------------------------------|-------------|
| Informations générales | |
| Identifiant | 152 |
| Latitude | 43.7 |
| Longitude | 7.3 |
| Population de la zone | <u>1430</u> |
| Densité de population | <u>4680</u> |
| Variables d'état | |
| q(t) : Quotidiens | 1430 |
| b(t) : Quotidiens bis | 0 |
| r(t) : Réflexes | 0 |
| c(t) : Contrôlés | 0 |
| p(t) : Paniqués | 0 |
| Relations de causalité | |
| B1 : r(t) -> c(t) | 0 |
| B2 : r(t) -> p(t) | 0 |
| C1 : p(t) -> c(t) | 0 |
| C2 : c(t) -> p(t) | 0 |
| S1 : c(t) -> r(t) | 0 |
| S2 : p(t) -> r(t) | 0 |
| y(t) : Fonction de forçage | 0 |

Pour vérifier que les notions de nœuds et d'arcs sont compréhensibles et mobilisables par les acteurs, nous avons élaboré, avec les collègues informaticiens, psychologues et géographes, un atelier original de réflexion pour un scénario de catastrophe. Il s'agit de faire identifier par les acteurs les lieux, les zones stratégiques du territoire du point de vue de l'analyse des comportements des populations. Cette identification des lieux et relations entre les lieux s'effectue sur la bache Gulliver (Fig. 54) avec la méthode des post-it.

Cet atelier, d'une durée de deux à trois heures, a été testé avec une partie des acteurs institutionnels de Nice en juillet 2019 au laboratoire Géoazur. D'autres séances seront prévues avec le groupe d'acteurs au complet. Une adaptation du protocole sera également réalisée auprès des acteurs havrais.

Le scénario imaginé pour l'atelier de réflexion est celui d'un tsunami d'origine sismique à Nice. Ainsi,

- le tsunami se déroulerait en journée, durant la saison estivale, lors d'un événement festif³⁵. Il y aurait donc une forte concentration de population avec un large panel de publics différents (adultes, enfants, personnes âgées). Cet événement va surprendre les populations qui sont concentrées sur la Promenade des Anglais (zone du front de mer à Nice),

³⁵ On pourra si besoin citer un exemple d'évènements festif : par exemple La traversée à la nage de la baie de Nice, le Festival du Livre, une exposition, un défilé etc.

- le tsunami immergerait ou serait en train d'immerger les plages de la Promenade des Anglais,
- au moment de la catastrophe, l'acteur institutionnel est présent, non pas dans le cadre de ses fonctions, mais comme un badaud.

Pour que les acteurs puissent « s'immerger » dans le jeu, il leur a été proposé de se projeter dans différents rôles, comme par exemple :

- a. la gestion de dynamique de foule,
- b. la gestion de blessés,
- c. la gestion d'évacuation,
- d. la gestion des personnes âgés, de leur protection etc.
- e. autres.

Une fois choisi le rôle dans lequel chaque acteur souhaite « jouer », il est demandé d'identifier sur la bêche :

- des lieux, des zones stratégiques par rapport au contexte de foule, aux réactions des populations,
- des zones sources de danger du fait de la présence de foule ou pour d'autres raisons,
- des zones refuges,
- des lieux d'information,
- des zones stratégiques pour leurs missions,
- des interactions entre les nœuds (c'est-à-dire les lieux connectés entre eux), afin de distinguer des nœuds actions et des nœuds d'information, des nœuds primordiaux et des nœuds satellites.

A chaque type de zone et donc de nœud correspond un code couleur (Fig. 74).

Figure 74 - Les différents types de zones identifiées par les acteurs (Com2SiCa)

| Identifier les nœuds importants en contexte de foule, ceux pouvant modifier, agir sur les comportements | Code couleur Post-It |
|--|-----------------------------|
| Des lieux, des zones stratégiques par rapport au contexte de foule, aux modifications des comportements | Blue |
| Des zones sources de danger en contexte de foule | Orange |
| Des zones de refuge pour la population | Green |
| Des lieux d'information | Yellow |
| Des zones stratégiques pour les missions | Pink |
| Des interactions entre les nœuds | Purple |

Le jeu se déroule ensuite sur la bêche, avec l'encadrement des chercheurs qui guident les acteurs si besoin, observent la façon dont ils s'approprient l'espace, discutent entre eux

etc. (Photo 18). Chaque acteur dépose sur la bache Gulliver un ensemble de post-it correspondant au code couleur de chaque nœud. L'acteur va ainsi raconter sa connaissance du territoire, ses actions (Photo 19) voire ses relations avec d'autres acteurs.

Photo 18 - Atelier de réflexion (© D. Provitolo, 2019)



Photo 19 - Un exemple de résultat d'atelier – Bâche Gulliver Nice Promenade des Anglais (© D. Provitolo, 2019)



Les premiers résultats obtenus sont positifs. Les acteurs ont à la fois pleinement participé au jeu et se sont appropriés sans difficulté les notions de nœuds et d'arêtes. Cet atelier a permis de tester la notion d'espace. Il a d'autres valeurs ajoutées, celles :

- d'identifier les réseaux de nœuds et d'arêtes construits par les acteurs, réseaux pouvant par la suite être intégrés dans les modélisations mathématiques,
- de repérer des endroits critiques sur le territoire,
- d'identifier des organisations d'évacuation et des relations entre acteurs (Buessler et Weber, 2016),
- de proposer ultérieurement une simulation qui permet de tester l'impact des aménagements sur les dynamiques comportementales et de décider ainsi des aménagements à apporter (par exemple renormaliser des escaliers, supprimer des barrières en haut des escaliers).

Conclusion - Les résultats attendus du programme de recherche Com2SiCa

Au niveau scientifique, ce programme de recherche, qui aura au-delà de la période de financement par l'ANR, fournira de nouveaux éléments d'analyse, de compréhension, de catégorisation et quantification des comportements humains, individuels et collectifs, en situation de crise. Les enquêtes réalisées auprès des acteurs de terrain et de la population permettront de faire avancer la connaissance dans un domaine encore peu pris en compte dans les exercices de gestion de crise, celui des réactions des populations. Les modélisations mathématiques permettront d'identifier les seuils critiques conduisant au chaos ou à l'émergence de comportements collectifs, le rôle des effets de dominos et des configurations spatiales sur les dynamiques comportementales, leurs modes de propagation et sur les situations d'évacuation d'urgence. Les méthodologies développées seront génériques et par conséquent applicables à l'étude des comportements lors d'événements imprévus (par exemple chutes de météorites ou actes terroristes), annoncés (par exemple ouragans ou épidémie connue) ou complexes (enchaînement d'événements). Il faut comprendre que ces situations d'auto-évacuation ou d'évacuation planifiée d'urgence sont différentes de celles où l'on considère les déplacements piétonniers ayant une trajectoire normale. En effet, lors d'une évacuation d'urgence, les populations pouvant être en proie à la panique, n'hésitent pas à avoir des comportements agressifs afin d'échapper à la situation. Des zones de forte pression apparaissent, dans lesquelles des personnes peuvent être parfois gravement blessées, voire trouver la mort. Les modélisations proposées doivent permettre :

- de pouvoir dégager, à partir des modélisations mathématiques basées sur les systèmes d'équations différentielles, des lois d'évolution globale des comportements, lois nécessaires pour les anticiper,
- d'identifier les nœuds stratégiques qui vont permettre de réduire le temps d'évacuation,
- d'optimiser la configuration de la ville pour assurer des dynamiques d'évacuation sans encombre,
- de comprendre le rôle de la réduction du temps d'évacuation sur les changements d'états comportementaux.

De par la « généralité » des modélisations mathématiques, la plate-forme de simulation pourra devenir non seulement un support aux projets scientifiques, mais aussi un outil pour les acteurs opérationnels (formation, information, simulation), qui bénéficieront d'un laboratoire artificiel permettant d'envisager de nombreuses situations, parfois extrêmes et disjointes spatialement (on pense aux actes terroristes multisites). Par le biais de la plate-forme, il s'agira d'essayer de comprendre les grandes tendances, d'identifier les principaux types de comportement pouvant se produire pour *in fine* permettre aux acteurs d'intégrer cette connaissance dans les plans de prévention des risques et de gestion des catastrophes.

Chapitre 10

La résilience des villes, des littoraux urbanisés et des organisations dans un contexte de changements globaux : vers une démarche opérationnelle globale

« Dans la réduction du risque de catastrophes, on s'est rendu compte tardivement que ce concept difficile [de résilience], avec ses problèmes de définition et de mesure, est néanmoins crucial pour la compréhension de la vulnérabilité, du risque » (D. Alexander, 2016)

Le contexte

Initialement focalisées sur l'étude des paramètres physiques de l'aléa, puis sur les vulnérabilités des sociétés et des territoires, les communautés scientifiques et les politiques publiques de gestion des risques et catastrophes mobilisent depuis peu le concept de résilience comme un nouveau référentiel d'analyse (cf. chapitre 1). Mais ce concept est peu opérationnel. De ce fait, la gestion du risque considère essentiellement le cycle classique « aléa-vulnérabilité-risque » pour tenter de déterminer les facteurs qui permettraient de limiter l'impact de l'aléa et de diminuer la vulnérabilité (thématique et statique) à l'aléa (Genin et Mazurek, 2016).

Les objectifs

L'un des défis actuels dans le domaine de la prévention et gestion des risques, des catastrophes et de la sécurité³⁶ des territoires et des populations, consiste à considérer le cycle « aléa-vulnérabilité-résilience-risque ». Pour intégrer la résilience dans ce cycle, il faut aller au-delà des analyses sur le concept de résilience et proposer des démarches de résiliences opérationnelles. En effet, dans la majorité des recherches, la difficulté de mettre en œuvre ces démarches apparaît clairement (Reghezza et Rufat, eds, 2015).

L'un des défis de la recherche à relever sera donc celui de rendre opérationnel ce concept de résilience. Pour ce faire, je proposerai :

- de mettre en œuvre le concept de résilience et la notion de « vulnérabilité résiliençaire » par des approches qualitatives et quantitatives,
- de questionner les facteurs de résilience afin d'identifier des indicateurs permettant de mesurer cette résilience,
- d'examiner si les indicateurs peuvent refléter l'aspect complexe et dynamique de la résilience,
- d'interroger les stratégies permettant de mettre en place le cycle « aléa-vulnérabilité-résilience-risque ».

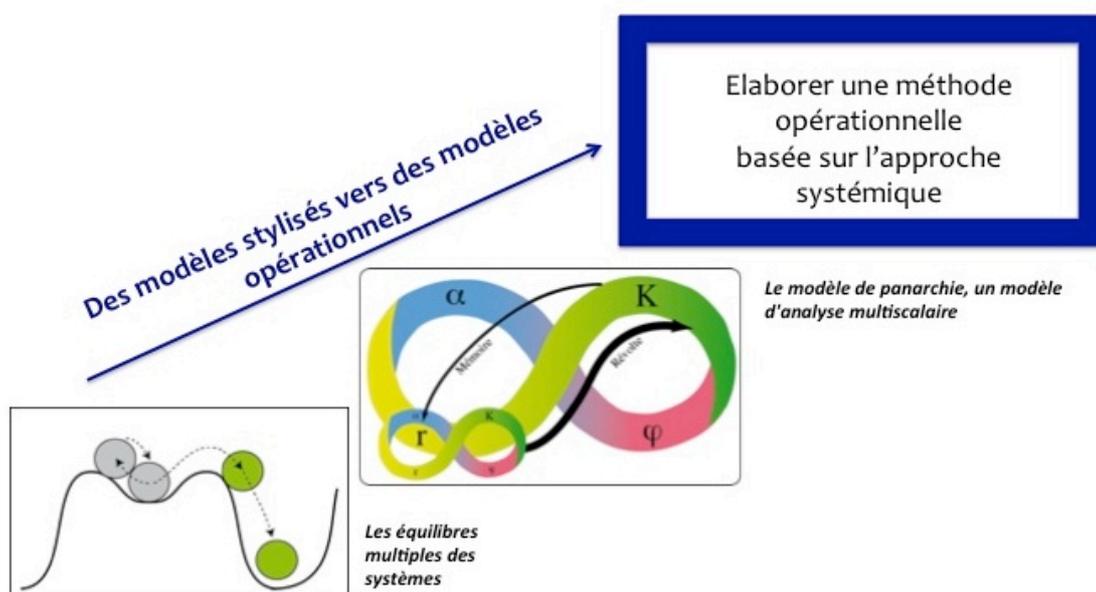
³⁶ L'approche sécuritaire, questionnée sous l'angle de la résilience (Lagadec, 2009) dépasse désormais largement les seules idées de protection et de contrôle.

10.1. Rendre le concept de résilience opérationnel par des approches qualitatives

Il n'existe pas de théorie de la résilience. De même, les modèles conceptuels pour analyser la résilience d'un système (écologique, territorial, urbain, organisationnel, étatique etc.) sont peu nombreux.

J'aborderai à court et moyen terme ces points de recherche en **développant des modèles systémiques, reproductibles et opérationnels d'analyse de la résilience des villes et des littoraux urbanisés, en prise avec des événements extrêmes, à dynamique rapide et se produisant de façon inattendue (Fig. 75)**. Ces modèles auront vocation à être mobilisables, tant par la communauté scientifique, pour établir des comparaisons de territoires urbains résilients, que par les acteurs opérationnels et institutionnels dans leurs démarches de construction et d'imagination de villes résilientes certainement autres que *les Smart Cities*.

Figure 75 – Vers un modèle opérationnel de résilience



Pour élaborer ce type de modèles, je m'appuierai sur les travaux de mes prédécesseurs. Ainsi, je réaliserai dans un premier temps un état de l'art des modèles conceptuels, puis j'interrogerai les stratégies de planification et de résilience permettant de penser des villes et des organisations résilientes. La réflexion sur ces stratégies devra venir alimenter les modélisations pour rendre ces dernières plus opérationnelles et en prise avec les organisations du secteur de la sécurité.

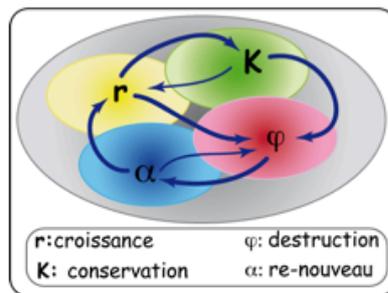
10.1.1. Réaliser un état de l'art des modèles conceptuels de résilience

Dans le domaine des modèles conceptuels de résilience, deux grandes catégories peuvent être distinguées : des modèles stylisés et des modèles opérationnels. Un état de l'art complet et critique de ces derniers devra être réalisé. J'en brosse ici quelques caractéristiques principales.

10.1.1.1. Des modèles stylisés fournissent un cadre de réflexion

La résilience peut être interprétée dans les modèles stylisés du *Cycle adaptatif* (Walker et al., 2004) (Fig. 76) et de *Panarchie* (Gunderson et Holling, 2002) (Fig. 6). Comme indiqué dans la première partie de ce mémoire, ces modèles décrivent les dynamiques et les différents états de stabilité d'un écosystème ou socio-écosystème exposés à une perturbation. Le cycle adaptatif est caractérisé par quatre états de stabilité qui, selon les capacités du système, sont traversés, dans l'ordre ou par saut qualitatif, par tout d'abord la croissance du système (r), puis sa conservation (K), ensuite son effondrement (φ) et enfin sa réorganisation, son re-nouveau (α) à la suite d'un choc. La résilience correspond ainsi à la capacité du système à passer d'un équilibre à un autre à travers ces quatre phases (Châtaignier, 2014). Toutefois, on ne peut pas étudier les socio-écosystèmes sans considérer la manière de laquelle ils sont gouvernés à différentes échelles. Le modèle de panarchie est ainsi venu compléter celui du cycle adaptatif pour traiter à la fois des transitions entre différents états de stabilité et des dynamiques d'échelles (cf. chapitre 2).

Figure 76 - Le modèle stylisé du cycle adaptatif (Source : Walker et al., 2004)



Ces modèles, essentiellement utilisés dans le domaine des systèmes écologiques et socio-écologiques, ont peu été mobilisés pour travailler sur les villes, leurs composantes (notamment populations, organisation, habitats, infrastructures critiques, activités économiques) et leurs modes de gouvernance. Ils apparaissent souvent comme difficiles à mettre en œuvre car ils utilisent un vocabulaire complexe (panarchie, bifurcation), sont organisés en phases globales et trop éloignées des réflexions locales et territoriales (par exemple, il peut sembler difficile d'analyser les phases de croissance, de réorganisation des territoires urbains à partir des modèles génériques du Cycle adaptatif et de Panarchie) et n'identifient pas les mécanismes de résilience.

10.1.1.2. Des modèles systémiques fournissent un cadre d'analyse plus opérationnelle

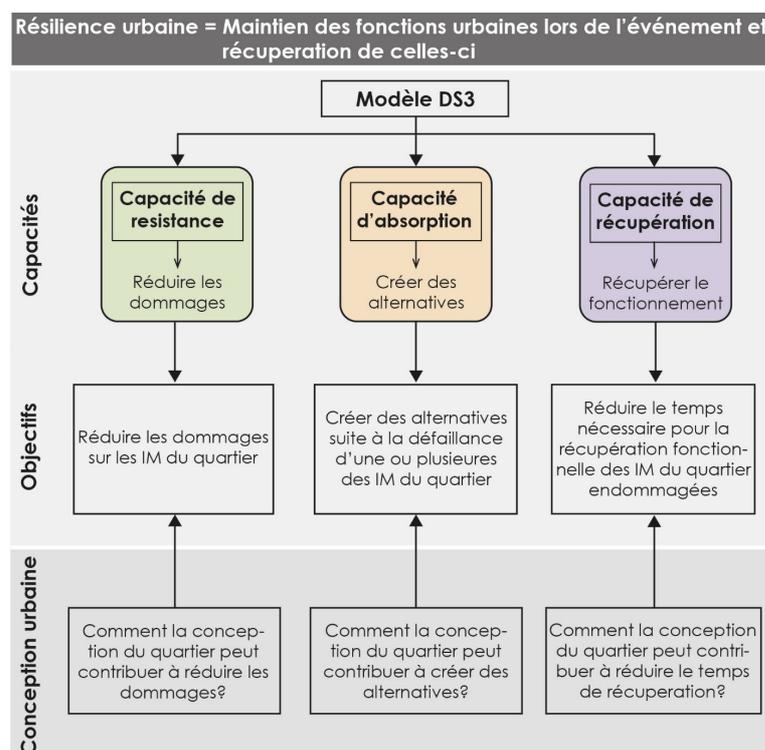
Face à ces limites, des modèles systémiques à portée plus opérationnelle ont été proposés. Certains *Behind the Barriers* (Barroca 2014) et *DS3 (Spatial Decision Support System)* (Serre, 2017) s'appliquent spécifiquement à l'étude de la résilience de systèmes techniques à l'échelle de quartiers ou de territoires vis-à-vis du risque d'inondation. D'autres s'affranchissent de la composante technique et proposent une réflexion à une échelle plus globale ou tout au moins territoriale. Il s'agit du modèle proposé par le groupe de recherche *Resilience Alliance* (2007) et de celui de « vulnérabilité résilience ». Je ne reviendrai pas sur ce dernier, présenté en détail dans la première partie de ce mémoire (cf. chapitre 2). Je rappellerai seulement i) qu'il casse les barrières semblant trop imperméables

entre vulnérabilité et résilience et propose une analyse à des échelles variées pour favoriser des actions et des pratiques s'inscrivant sur différentes temporalités, ii) qu'il présente plusieurs limites, la principale étant d'être trop générique pour être mobilisé dans le cadre d'une recherche impliquée en prévention des risques et gestion des catastrophes.

Les modèles *Behind the barriers* et *DS3 (Spatial Decision Support System)*

Les modèles *Behind the barriers* et *DS3 (Spatial Decision Support System)* sont centrés autour des systèmes techniques et de leurs capacités à faire face aux inondations urbaines. Dans le modèle *DS3*, l'échelle du quartier urbain a été retenue pour opérationnaliser le concept de résilience, tandis que le modèle *Behind the barriers* privilégie l'échelle territoriale. Ces auteurs ont proposé deux modèles qui permettent i) *a posteriori* de définir les facteurs de résilience mobilisés lors de la conception de ces quartiers, ii) *a priori* de guider de nouvelles opérations d'aménagement résilient face au risque inondation en capitalisant les expériences réalisées. Construit dans une logique systémique, le modèle *Behind de barriers* propose de prendre en compte différents types de résilience (fonctionnelle, corrélative, et cognitive) afin de considérer les relations entre les systèmes techniques et la morphologie urbaine (Barroca, 2014). Le modèle *DS3*, quant à lui, est davantage analytique. Il pose comme postulat que cette résilience peut s'évaluer sous le prisme des capacités de résistance, d'absorption et de récupération (Fig. 77). Ces trois capacités doivent être questionnées lors de la conception d'un quartier urbain résilient, au regard non plus d'une dissociation inondé/sec, excédent/pénurie, ou vulnérable/résistant, mais plutôt selon le couple fonctionnel/perturbé. Ces modèles, certainement complémentaires, se focalise donc essentiellement sur l'un des éléments urbains, celui du maintien des fonctions urbaines liées aux infrastructures majeures.

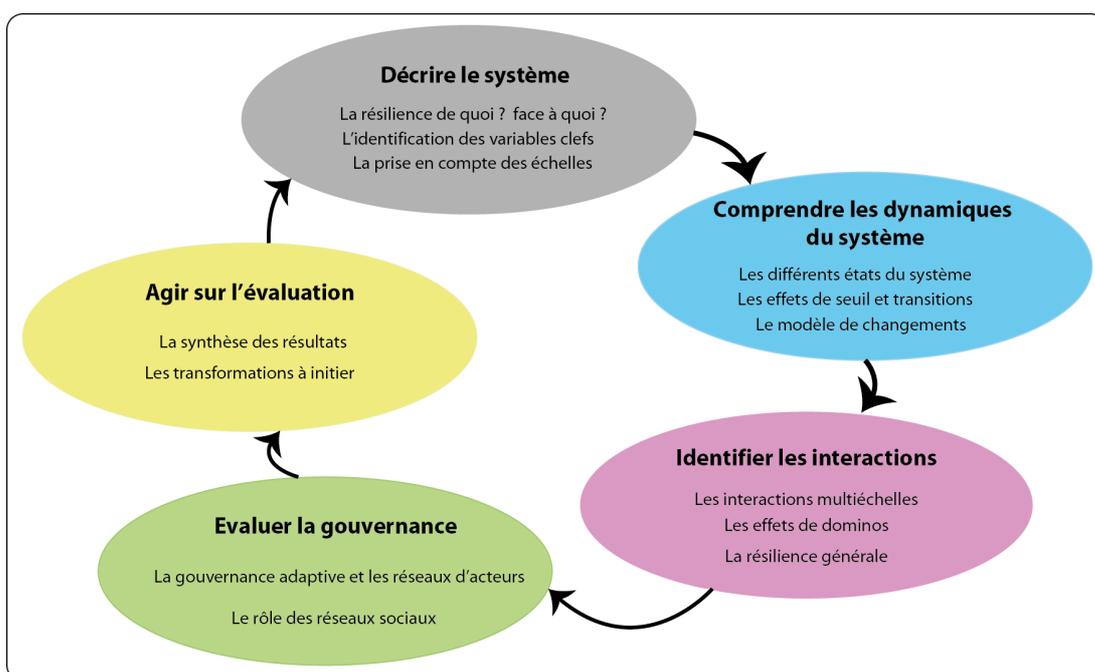
Figure 77 - Le modèle DS3 (*Spatial Decision Support System*) (Source : D. Serre, 2017)



Un modèle à portée opérationnelle : *Resilience Assessment Framework*,

Un autre modèle, établi par le groupe de recherche Resilience Alliance, propose un cadre d'évaluation de la résilience territoriale ; il est structuré autour de cinq étapes connectées les unes aux autres (Fig. 78). La première consiste à décrire le système et à répondre à la question : la résilience de quoi face à quoi ? La seconde vise à comprendre les dynamiques du système afin d'identifier dans une troisième étape les interactions multiéchelles et les possibles effets de dominos. La quatrième consiste à évaluer la gouvernance d'un territoire pour, dans une cinquième étape, agir sur l'évaluation de la résilience du système. Il s'agit dans cette dernière étape d'initier des transformations dans des domaines aussi variés que la prise en compte des risques dans l'aménagement du territoire, la culture du risque, sa formation, sa perception du risque, sa communication et ses systèmes assurantiels. Ce modèle fournit donc un cadre systémique suffisamment générique pour être adapté à des systèmes et à des échelles variés (territoires urbains, ruraux, quartier, ville, région, nation etc.) et a fait l'objet d'application permettant une certaine « opérationnalisation ». Toutefois, sans indiquer plus précisément quelles dynamiques spécifiques du système étudier, quelles interactions entre les composantes sont primordiales, comment évaluer la gouvernance, il reste trop générique.

Figure 78 - Un cadre d'analyse de la résilience (Source : d'après *Resilience Alliance*, 2007)



Dans la réalité, ces modèles sont rarement utilisés en France par les chercheurs et méconnus des acteurs institutionnels ou opérationnels. Outre la barrière linguistique, qui fait que les modèles du Cycle adaptatif, de Panarchie et de Resilience Alliance n'ont pas dépassé les frontières, ces méthodes sont difficiles à mettre en œuvre car elles utilisent un vocabulaire complexe et sont trop éloignées des demandes et besoins opérationnels. Quelques tentatives existent cependant en ce domaine, notamment les modèles *Behind the barriers* et *DS3*.

Dans cette même philosophie de construction des résiliences des territoires et sociétés, j'envisagerai une démarche opérationnelle globale permettant d'inclure les étapes de compréhension et d'analyses des systèmes (villes, littoraux urbanisés, organisations), de conception d'actions ciblées permettant d'articuler les différentes temporalités de la résilience et par là-même les mesures politiques *ex-ante* et *ex-post*. Je m'intéresserai dans un premier temps aux dimensions sociale, organisationnelle, économique et physique de cibles majeures lors d'inondation soudaine avant d'élargir ma réflexion à une gamme plus large de risques soudains et imprévus.

Ces modèles à portée opérationnelle amèneront également à questionner les stratégies de planification et de résilience, ces dernières s'opposant dans leur rapport à l'imprévu.

10.1.2. Les stratégies d'anticipation et de résilience pour faire face aux risques et catastrophes

« La vie quelle qu'elle soit (de l'homme, des écosystèmes, des territoires etc.) étant un tout, il est normal que la résilience soit portée sur plusieurs temporalités », (S. Lhomme, 2012)

Renforcer la résilience des territoires et des populations amène à discerner des actions et des pratiques liées à différentes échelles de temps (Mazurek, 2017), celles s'inscrivant dans la temporalité de la prévention des risques de catastrophes, celles de la gestion des catastrophes et de l'urgence, celles de la remise en état, de la reconstruction, voire de la réorganisation des territoires, celles de la consolidation des pratiques résilientes, celles des retours d'expérience (ReTex) afin de tirer les enseignements d'évènements passés dans une vision prospective permettant de réintroduire « dans la notion même de risque le processus d'apprentissage (voire d'innovation) que peut constituer la situation postcatastrophe » (Genin et Mazurek, 2016).

Des stratégies doivent donc être pensées pour réduire les risques de catastrophe, faire face aux changements globaux, à leurs répercussions futures, et protéger les populations.

10.1.2.1. Les questions de recherche et les objectifs

Stratégie est un mot construit à partir de deux termes grecs : stratos (armée) et agos (conduite). La stratégie est donc initialement l'art de conduire une armée. Ce terme est ensuite apparu dans le management d'entreprise et des organisations (Thiéart et Xuereb, 2015).

Je questionnerai à moyen terme deux couples de stratégies qui s'offrent aux organisations de sécurité (Journé, 2001). Le premier couple porte sur le processus d'élaboration des stratégies (Mintzberg, 2004). Y sont opposées les stratégies basées sur la planification à celles basées sur l'émergence. La planification permettrait de donner une réponse rapide et sans erreur aux risques connus par la mise en place de règles et de procédures, de plans préétablis. Mais cette stratégie, en s'opposant à l'improvisation, tout étant édicté dans le plan, permettrait difficilement de répondre aux évènements imprévus et non anticipés. L'émergence, quant à elle, ouvrirait la voie aux traitements d'évènements imprévus et incertains. Il ne s'agit plus de mettre en œuvre un plan préconçu, mais d'entraîner les organisations et leurs acteurs à agir et réagir face à l'imprévu.

Le deuxième couple porte sur le contenu des stratégies en opposant anticipation à résilience (Wildavsky, 1988). Cet auteur propose les définitions suivantes : « *Anticipation is a mode of control by a central mind ; efforts are made to predict and prevent potential dangers before damage is done. [...] Resilience is the capacity to cope with unanticipated dangers after they have become manifest, learning to bounce back* ». L'anticipation et la résilience présentent des avantages et des inconvénients complémentaires. L'anticipation permettrait de répondre rapidement et sans erreur aux problèmes connus car elle est construite sur la stratégie de planification. Mais elle est certainement vulnérable face aux problèmes non anticipés, en laissant les acteurs sans recours lorsqu'ils sont dans une situation imprévue. La résilience, quant à elle, permettrait de traiter l'inconnu, l'imprévu et l'incertitude. Mais elle suppose un certain tâtonnement et cette stratégie pourrait passer pour de l'impréparation et du manque d'organisation, notamment aux yeux du public (Marcus et Nichols, 1999).

Ces deux catégories de stratégies soulèvent donc des questionnements :

- quels sont les intérêts et limites de ces stratégies appliquées au domaine des risques et catastrophes ? Quelle grille de lecture établir pour les comparer ? Comment les intégrer dans des modèles ?
- les unes sont-elles plus adaptées que les autres à certains types de risques, ceux récurrents et bien connus, ceux plus rares et complexes ? La résilience étant une réponse à l'incertitude, demandant d'être plus réactif, plus flexible, est-elle aussi efficace pour tous les types de risque ? Doit-elle systématiquement remplacer les stratégies de mitigation (politique d'aménagement du territoire, construction parasismique), qui font également leurs preuves pour les phénomènes connus, documentés etc. ?
- ces stratégies, bien que souvent présentées comme contradictoires, ne seraient-elles pas en réalité complémentaires ? Par exemple, les exercices de gestion de crise (tel Sequana 2016 qui s'est déroulé sur le territoire francilien) ayant pour objectif d'entraîner, en cas d'inondation, de séisme, d'attentat etc., les services gestionnaires de la crise (préfecture, services déconcentrés, communes, établissements publics dont les établissements scolaires,...) sont le plus souvent construits dans un double objectif : tester les plans préétablis et injecter de l'information « déstabilisante », voire contradictoire, pour « forcer » les gestionnaires à improviser en situation de crise.

10.1.2.2. La méthodologie de travail

Pour répondre à ces questions, j'investirai les travaux d'A. Wildavsky (1988) et de H. Mintzberg (1994, 2004) sur les stratégies et le management accordant une place importante aux phénomènes émergents et au rôle de l'intuition pour faire face à un environnement incertain, complexe, changeant et ambigu. Cet environnement correspond bien à celui des risques. Pour y faire face, H. Mintzberg préconise par exemple la stratégie « en ombrelle » où les directions de différentes organisations planifient les grands objectifs, définissent les cibles, tout en laissant plus de marge à l'émergence d'actions nouvelles, réfléchies et adaptées aux contraintes de la situation (par exemple, celles environnementales et organisationnelles). Cette stratégie est utilisée dans le domaine du management et il s'agira de l'examiner pour vérifier si elle peut s'adapter aux organisations du domaine de la sécurité. Dans l'affirmative, quels sont ses intérêts et ses limites ? En

effet, renforcer la résilience globale de la société nécessite de s'appuyer sur des institutions de sécurité résilientes (Leboeuf, 2014). En cas de crise ou de catastrophe majeure, les acteurs civils et les échelons locaux et régionaux (niveau micro-organisationnel) n'ont pas toujours les moyens de gérer les événements. Ce sont alors les forces armées, les ONG, les organisations de sécurité de la planète (niveau macro-organisationnel) qui interviennent sur le territoire national. D'autre part, dans quelle mesure une organisation de sécurité est-elle, doit-elle être résiliente ? Quels sont les éléments qui l'affaiblissent ? La résilience des organisations est-elle forcément synonyme de flexibilité et de souplesse ?

10.1.2.3. Les résultats attendus

Les résultats attendus sont multiples et visent à :

- définir des stratégies de résilience. Préciser quelles en sont leurs caractéristiques,
- distinguer les stratégies dédiées à des risques connus et les stratégies de résilience dévolues aux risques incertains ayant des dynamiques temporelles distinctes (incertitude du climat futur, des risques extrêmes),
- identifier les leviers et barrières à la résilience relevant de dimensions comportementales (comportements des acteurs et des populations, rapports sociaux, effets de solidarité etc.) et organisationnelles.

10.2. Rendre le concept de résilience opérationnel par des approches quantitatives

Dans mes perspectives de recherche, je souhaite également proposer des mesures de résilience qui s'adapteraient à la plupart des risques. Ces mesures peuvent être établies soit de façon empirique (par exemple le temps de remise en état des routes), soit de façon analytique (avec une fonction mathématique).

10.2.1. Des mesures établies de façon empirique

Les définitions disciplinaires de la résilience ont fourni les premières appréciations quantifiées. D'abord, la résilience serait mesurable par l'ampleur maximale de l'aléa qui permet un retour en arrière sans détruire le système. Ainsi, en écologie, la résilience est parfois mesurée par la disparition d'une partie ou de toutes les espèces d'un écosystème. Les écologues ont d'abord mesuré la résilience par la somme totale de toutes les espèces disparues d'un écosystème. Puis, ils ont remarqué le rôle déterminant de certaines espèces, dont l'absence provoque très vite la disparition de tout l'écosystème, et ils ont alors proposé de nouvelles mesures de la résilience, plus conformes à l'idée de reconstruction d'un écosystème. Mais ces indicateurs n'ont pas grand sens pour mesurer la résilience d'une région, d'une ville, d'un territoire.

Dans un autre registre, mais tout aussi simplement, la résilience est évaluée par la persistance, l'intervalle de temps pendant lequel persiste la valeur d'un descripteur, par exemple un poids de biomasse en écologie. La résilience est alors l'inverse d'un temps de retour. Elle mesure en effet la durée nécessaire au retour à un équilibre stable après une perturbation. Ce temps de retour dépend de trois paramètres essentiels : l'ampleur de la catastrophe, l'adaptabilité de la société, et le type de bien considéré. Après une catastrophe, on peut facilement imaginer une mesure de résilience pour la restauration du système sur le court terme. Cette mesure pourrait être réalisée par exemple en quantifiant

la durée mise par le système pour retrouver un fonctionnement normal de ses structures, tels les réseaux critiques, ou les activités économiques. Dans l'étude des risques, cette méthode d'évaluation offre l'intérêt d'être comparable à la mesure de l'aléa qui est souvent évalué par un temps de retour. Cette résilience est souvent qualifiée de résilience physique.

Toutefois, il existe une résilience différentielles à l'intérieur d'une ville, d'un territoire car, après une crise, les différentes composantes du système n'évoluent pas à la même vitesse. Certains quartiers, certaines fonctions, certaines activités se rétablissent plus vite que d'autres. Ainsi, après le passage du cyclone Ofa en février 1990 en Polynésie, la récolte de taro fut retardée de deux à quatre mois, mais il fallut neuf à dix mois avant d'avoir une nouvelle production de banane, et plus de vingt-quatre mois pour disposer d'une nouvelle récolte de cacao. De même, S. Menoni (2001) a montré qu'à Kobé, « la reconstruction s'est effectuée en deux temps. Elle a été très rapide pour le tissu économique et les infrastructures associées, ce qui s'est traduit localement par la reconstruction du port. Elle a en revanche été très lente pour les particuliers et donc, les quartiers d'habitation » (Djament-Tran et Reghezza-Zitt, 2012).

Cette ensemble de remarques doit amener à questionner sur quelle(s) temporalité(s) mesurer la résilience urbaine. Peut-on distinguer une résilience de court terme et une résilience de long terme (par exemple par rapport à une perspective écosystémique, humaine, territoriale, politique etc.) ?

La réflexion sur les temporalités des risques et des catastrophes, et sur les mesures pouvant être associées à ces temporalités, permettra d'explicitier en quoi des retours à l'état d'équilibre d'un système, d'un territoire, suite à une catastrophe sont ou non une marque de résilience.

Dans le cas d'un système urbain, en cas d'évènement (mineur ou extrême), le territoire revient à un état d'équilibre après la crise. Il y a dans un premier temps, une volonté de « maintenir les apparences » avec une tentative de retour à la normale. La résilience qui suit immédiatement la perturbation serait une réponse directe du système permettant de faire face à l'endommagement et au dysfonctionnement. A cette échelle temporelle, la résilience serait alors une stratégie permettant de limiter les impacts, ainsi qu'une capacité à assurer en partie le fonctionnement du système durant le temps de l'endommagement.

Mais si le système revient à l'état d'équilibre initial, il revient au même stade que celui précédent la catastrophe. Il n'a donc pas appris de cette dernière, il n'a pas évolué. Il est donc potentiellement de nouveau vulnérable à un évènement de même type et de magnitude similaire ou plus importante. Dans ce cas, la mesure de la rapidité de temps de retour à la situation initiale est-elle une mesure pertinente ? Ne faudrait-il pas imaginer d'autres indicateurs de mesure faisant référence à différents facteurs (Fig. 5) permettant d'augmenter la résilience d'un système soumis à une perturbation : l'adaptation, l'innovation, la diversité, l'apprentissage et l'auto organisation sont souvent cités dans la littérature. Il s'agira de questionner en quoi ces facteurs améliorent la résilience. Le permettent-ils quelles que soient les échelles d'analyse ? Il y a en effet un contre-exemple, celui de l'émergence de panique collective qui est bien un phénomène auto-organisé (cf. partie 2), mais il est non désiré lors d'une catastrophe.

Pourrait-on identifier d'autres facteurs favorisant la résilience ? Quels sont les indicateurs

permettant d'évaluer le rôle de ces facteurs ? La recherche de ces indicateurs soulèvera de nombreuses questions. Peuvent-ils refléter l'aspect complexe et dynamique de la résilience ? La résilience n'étant pas une caractéristique stable et immuable au fil du temps mais plutôt un processus continu d'interactions, peut-on la saisir, la cerner via des indicateurs ? Recherche-t-on un indicateur unique et universel ou plutôt un jeu d'indicateurs ? Par exemple, pour prendre en compte la diversité et l'autonomie des acteurs, leur capacité auto-organisatrice, il est possible de retenir un indicateur de démocratie locale. La présence d'équipements, localisés hors de la zone dangereuse, mais utiles pour reconstruire un territoire ravagé par une catastrophe, est aussi un indicateur à prendre en compte, et le degré d'apprentissage pourrait être mesurable par des indicateurs qui traduisent le niveau de formation d'une population aux risques qui la menacent. Enfin, un indicateur d'écart pour le facteur de remise en état des services, pourrait être monétaire, temporel, multidimensionnel. Autant de pistes à creuser.

Ces indicateurs de résilience offrent très certainement deux avantages. D'abord, ils sont cartographiables, et donc facilement intégrables dans un SIG. En outre, leur compréhension est relativement simple pour des décideurs qui doivent agir vite. En contrepartie, leur interprétation est fonction des variables retenues, de leur combinaison, et ils donnent parfois des informations similaires pour des situations relativement différentes. Malgré ces limites, cette démarche est à encourager en l'état de nos connaissances.

Il est également possible de rechercher, non plus un indicateur d'écart, mais de changement qualitatif qui exprimerait une rupture ? (Dubois et Ouattara, 2014). Une autre piste pour donner une valeur à la résilience, serait alors de se tourner vers les modélisations.

10.2.2. Des mesures issues des modèles de simulation

Quelques modèles ont été développés à partir d'outils de simulation comme les systèmes multi-agents (Etienne, 2003 ; Bousquet et Le Page, 2004) ou de la théorie de la viabilité³⁷ (Aubin, 1991 ; Deffuant et Gilbert, Eds, 2011). Ces modèles sont certainement une voie intéressante pour opérationnaliser le concept de résilience (Martin, 2005). A plus long terme, mon projet visera donc à investir la dynamique des systèmes et la théorie de la viabilité, dans un partenariat interdisciplinaire avec des collègues mathématiciens et d'autres spécialistes des questions de résilience, afin d'évaluer la résilience de systèmes complexes, celle des villes et des organisations.

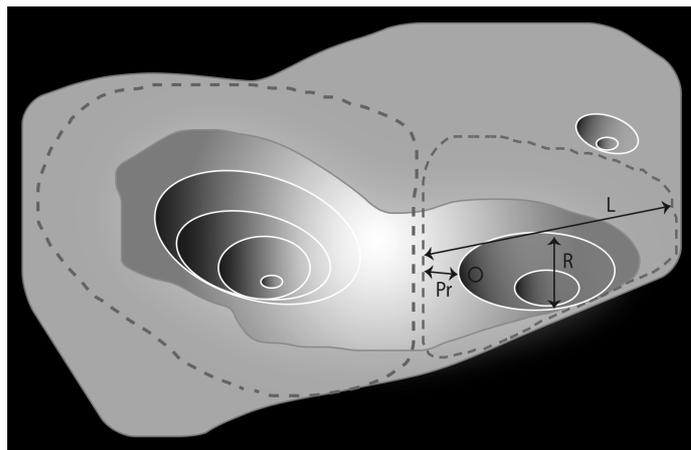
Dans un premier temps, j'aurai pour objectif de mobiliser la modélisation en dynamique des systèmes pour formaliser la résilience des villes et des organisations. En effet, les outils de mesure les plus précis, et en même temps les plus généraux, sont dérivés de la dynamique de système. Cette formalisation amènera à interroger la définition mathématique et académique de la résilience basée sur les attracteurs et les bassins d'attractions (Murray *et al.* 1994) et qui définit la résilience, tout au moins celle des écosystèmes, comme le retour à un nouvel état d'équilibre. La figure 2 (cf. chapitre 1) illustre des états d'équilibre stable et instable dans un paysage. Il s'agira de questionner

³⁷ La théorie de la viabilité fournit un cadre mathématique pour étudier les évolutions viables d'un système dans des environnements changeants

cette notion d'équilibre pour savoir si elle est pertinente pour traiter le cycle « aléa-vulnérabilité-résilience-risque » et inclure les actions et mode de gouvernance des risques et catastrophes. En effet, « le problème avec les individus et la société, est l'absence d'une base pour l'équilibre. Tout est tendanciel » (Alexander, 2016), car le comportement d'un système complexe est guidé par plusieurs attracteurs.

Ces attracteurs sont l'équivalent des points bas d'une carte topographique qui attirent les eaux de pluie. Chaque attracteur capte les trajectoires issues de son bassin d'attraction (Fig. 79). De ce schéma valable pour tout système, les chercheurs déduisent trois indicateurs de la résilience. La taille du bassin d'attraction, qualifiée parfois de latitude (L), est un premier indicateur. Plus ce bassin est vaste et plus la résilience est grande, car la probabilité pour un système de changer d'attracteur est d'autant plus grande que le bassin d'attraction est petit. La profondeur de cet attracteur (R), qui mesure indirectement sa force, est un second indicateur de la résilience, bien que cette profondeur soit parfois qualifiée de résistance. Il faut en effet de plus grandes perturbations pour changer le système quand cette profondeur est grande, quand la valeur de la résistance est élevée. Enfin, la précarité (Pr) est donnée par la localisation de l'état du système par rapport à la limite du bassin d'attraction. Elle est égale à la distance qui sépare le point figurant l'état du système d'un seuil, d'une limite d'un bassin d'attraction. Un état du système, très proche de la frontière d'un bassin d'attraction, est moins résilient qu'un autre état centré sur l'attracteur même. Plus le système se rapproche de la limite du bassin d'attraction et plus un changement qualitatif d'état, un saut vers un autre attracteur, est possible. Mais modéliser les systèmes dans ce formalisme n'est pas chose aisée. Il s'agira en effet d'identifier les variables d'état et de contrôle de système aux multiples composantes (humaines, organisationnelles, fonctionnelles, économiques, politiques etc.), ses frontières et échelles d'analyse et de les formaliser mathématiquement.

Figure 79 – Un paysage de stabilité à trois dimensions avec deux bassins d'attraction (d'après : Walker *et al.*, 2004)

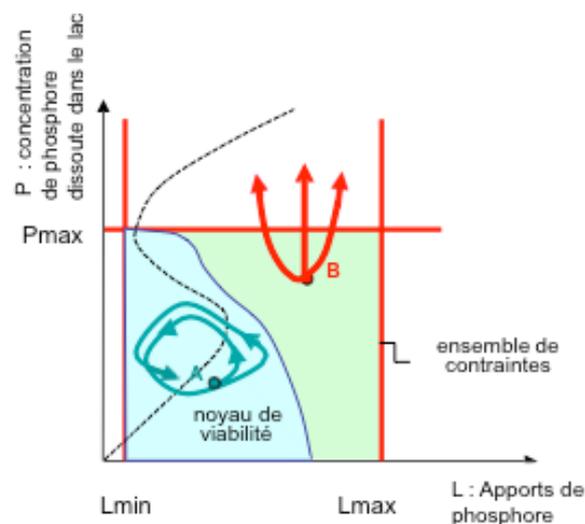


Dans un deuxième temps, et à long terme, je souhaiterais investir la théorie de la viabilité pour traduire les enjeux de la résilience dans ce formalisme. Cette théorie est présentée comme un formalisme adapté lors de la difficulté de définir ce qui est optimal et quand il s'agit de réaliser des négociations entre acteurs (ceux par exemple favorisant les mesures de prévention des risques, ceux intervenant dans la phase de gestion de catastrophes), l'un des enjeux de l'étude de la résilience étant d'éviter des situations dans lesquelles des

perturbations et des chocs peuvent conduire à des situations irrémédiables et de faciliter la restauration des propriétés essentielles.

Elle a été utilisée dans le domaine des systèmes socio-écologiques. S. Martin (2005) a par exemple appliqué cette théorie à l'eutrophisation des lacs liée notamment aux engrais agricoles. L'eutrophisation ayant des effets néfastes sur la qualité de l'eau (et donc sur l'activité touristique), l'objectif est de conserver à la fois un lac en bonne santé et une activité agricole dans le bassin versant. Il s'agissait dès lors d'identifier le noyau de viabilité, c'est-à-dire le maintien d'un système dynamique dans un ensemble de contraintes (Aubin, 1991). Ce noyau représente l'ensemble des états à partir desquels il est possible de contrôler le système pour rester dans l'ensemble des contraintes. Les états souhaitables du système sont ceux où la concentration maximale de phosphore dans le lac (P) permet de prévenir l'eutrophisation, et ceux où la valeur limite de phosphore admissible (L) permet d'éviter une pollution de l'environnement (Fig. 80). Il ne s'agit donc pas de chercher une fonction de contrôle, mais de trouver une suite de contrôles permettant de rester dans le noyau de viabilité.

Figure 80 – L'identification du noyau de viabilité pour des exploitations riveraines d'un lac (Source : S. Martin, 2005)



Le modèle a donc été construit pour le domaine des socio-écosystèmes. Il serait intéressant d'appliquer cette théorie de la viabilité (Aubin 1991) à la résilience urbaine et à celle des organisations. Concernant l'étude des systèmes ouverts, cette théorie paraît à ce titre pertinent. Dans cette théorie, les variables sont divisées en deux classes :

- celle du système étudié, supposé autonome, c'est-à-dire évoluant selon ses propres lois,
- celle de l'environnement auquel ce système est confronté, lui imposant ainsi des contraintes « externes », auxquelles il doit s'adapter, en utilisant diverses stratégies.

Les variables décrivant le système sont classées en plusieurs catégories qui jouent des rôles différents dans leur évolution. Sont distinguées les variables d'état et de contrôle.

Pour identifier ces variables, il conviendra de bien poser le(s) problème(s) en répondant à une série de questions. A l'échelle d'une ville, comment formaliser la résilience urbaine comme un élément de prévention ? Comment formaliser la résilience urbaine comme un élément de sortie de catastrophe ou de crise ? Comment articuler ces différentes formes de résilience jouant sur des temporalités différentes ? Les mêmes questionnements se poseront à d'autres échelles, par exemple celle de la résilience des organisations.

Quelles sont les variables d'état du problème permettant de décrire le système. Elles pourraient par exemple correspondre, en géographie des risques, aux comportements des acteurs et des populations (variables d'état communes à l'étude de la résilience urbaine et de celle des organisations), aux comportements physiques des bâtiments, aux zones refuges et aux zones d'évacuation des déchets, aux réseaux durs et softs.

Quelles sont les variables de contrôle du problème permettant de décrire les actions et pratiques envisageables pour modifier l'évolution du système. Si l'on s'intéresse à la résilience comme élément de sortie de catastrophe, les variables de contrôle peuvent être de l'information sonore (sirène), visuelle (présence d'acteurs opérationnels), et des interventions effectives par ces opérationnels sur le terrain. S'il s'agit de la résilience comme un élément de prévention, les variables seront celles des politiques publiques.

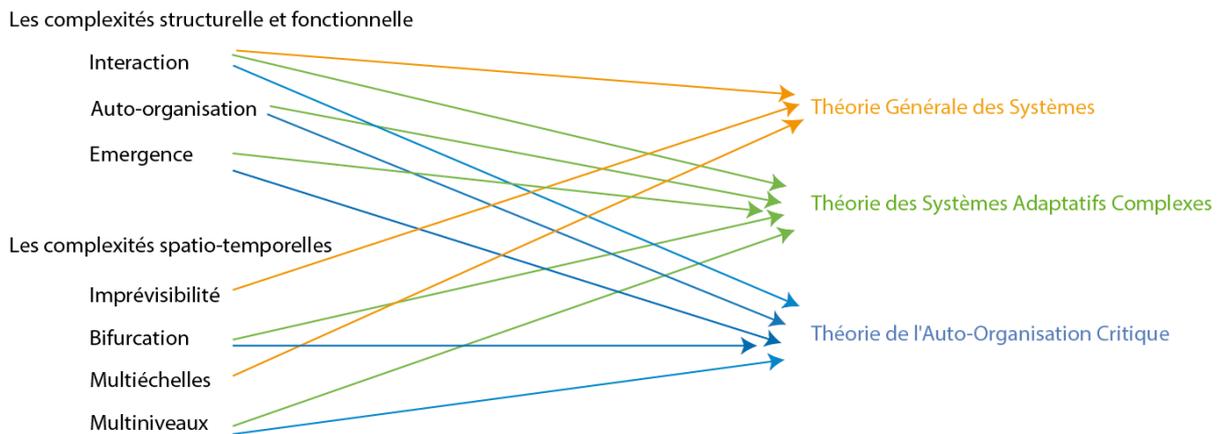
Comme le précise S. Martin (2005), cette théorie peut permettre de donner **une mesure de la valeur de la résilience, cette mesure pouvant correspondre à l'inverse du coût nécessaire pour préserver et restaurer certaines propriétés du système, ce qui se ramène au calcul d'un noyau de viabilité**. Ainsi, le coût maximal de cette restauration sera l'inverse de la valeur de la résilience. Donc, la valeur de la résilience sera infinie si, à la suite de toute perturbation envisagée, la propriété peut être préservée ; cette valeur sera nulle si l'une des perturbations envisagées cause une perte irrémédiable de la propriété ; enfin, elle sera finie mais non nulle si, à la suite des perturbations envisagées, la propriété est temporairement perdue, mais pourra être restaurée.

Un vaste champ d'investigations, que je n'ai fait ici qu'effleurer !

CONCLUSION GENERALE

Le recours à la complexité est loin d'être aisé. Il n'existe aucune théorie unifiée de la complexité adaptée à la compréhension du domaine des risques et catastrophes et à sa gestion. Le chercheur dispose plutôt d'un panel de théories permettant de rendre compte des nombreuses formes de la complexité : celles d'ordre structurel et fonctionnel mobilisent les phénomènes d'interaction, d'auto-organisation et d'émergence de comportements humains collectifs, celles d'ordre spatial et temporel révèlent davantage l'imprévisibilité des catastrophes étudiées, leur caractère multiéchelles et multiniveaux (Fig. 81).

Figure 81 – Une diversité de théories pour étudier les complexités des risques et catastrophes (D. Provitolo)



Mon objectif a donc été de rendre compte de phénomènes difficilement prévisibles marqués par des changements qui mettent au défi de représenter à la fois les structures et les dynamiques. J'ai donc réalisé une série de modélisations dont les objectifs diffèrent : modèles conceptuels et ontologiques pour saisir la polysémie du concept de résilience et ses relations avec la vulnérabilité, modèles mathématiques pour comprendre l'émergence de comportements humains collectifs, modèles décisionnels pour aider les acteurs institutionnels dans leurs prises de décisions relatives à la prévention et la gestion de différents types de menaces naturelles (inondation, tsunami, glissement de terrain), menaces ayant pour traits communs la soudaineté, l'imprévisibilité et les dynamiques rapides.

Mes recherches sur la complexité des risques et catastrophes ont ainsi contribué à :

- constituer de nouveaux outils de pensée pluri- et interdisciplinaire afin de relier des connaissances parcellaires,
- produire des modèles explicatifs et des modèles prédictifs des risques, des vulnérabilités et résiliences territoriales, des comportements humains,
- afin d'anticiper la complexité des situations, complexité à laquelle les décideurs publics et le citoyen devront faire face.

Dans la continuité de ces travaux, je propose de développer deux axes de recherche complémentaires déclinant l'étude de la résilience sur trois échelles d'analyse (micro-mésomacro) :

- la résilience, la sécurité et la sûreté des populations : « prédire » et anticiper les comportements humains, individuels et collectifs leurs dynamiques spatio-temporelles et les évacuations d'urgence,
- la résilience des villes et des organisations dans un contexte de changements globaux : rendre opérationnel le concept de résilience.

En privilégiant le domaine des risques et catastrophes et les thématiques des résiliences humaines, organisationnelles, urbaines et environnementales ce programme de recherche, basé sur l'innovation, est au cœur des cadres internationaux pour la programmation et le soutien à la recherche. Question sociétale avérée, et ce de plus en plus dans le contexte de changements globaux, on peut en effet constater une certaine permanence de l'actualité de la question des risques pour les socio-écosystèmes, les territoires et les populations, qu'ont incarnée l'élaboration du cadre d'action de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe, repris dans l'accord de Paris, et la création du *Disaster Risk Management Knowledge Centre* par le JRC. Les conclusions de la 13^{ème} édition du *Global Risks Report 2018 du World Economic Forum* viennent encore tout récemment de le confirmer : *Environmental risks have grown in prominence over the 13-year history of the Global Risks Report, and this trend continued in the latest GRPS*. De même, le Belmont forum a ouvert en 2018 une CRA (*Collaborative Research Action*) sur le thème *Disaster Risk reduction and resilience*. En parallèle, des réflexions sont engagées par *Future Earth* sur un nouveau domaine « *Risk and Disaster Prevention* » pour engager un *Knowledge-Action Network*.

Pour finir, ces perspectives de recherche s'inscrivent également dans des axes stratégiques de l'Université Côte d'Azur et du CNRS orientés vers :

- le développement des recherches trans- et interdisciplinaires avec des collaborations menées dans le cadre de projets de recherche avec des collègues issus d'horizons disciplinaires variés : géographie, géosciences, psychologie, neurosciences et économie, mathématiques, informatique.
- les grands défis sociétaux qui soutiennent la **Stratégie Nationale de la Recherche**, et plus spécifiquement les orientations 39 et 40 de la SNR encourageant l'étude des comportements humains individuels et collectifs face aux crises et la modélisation et simulation des phénomènes critiques dont font partie les réactions collectives.
- les transferts de connaissances et de résultats vers le monde des collectivités locales (objectifs territoriaux) et vers la société (objectifs citoyens).

TABLES DES ILLUSTRATIONS

TABLE DES FIGURES

| | |
|--|-----|
| Figure 1 - Les trois univers de la science | 15 |
| Figure 2 – Une représentation d'équilibres stables et instables : analogie avec une sphère | 23 |
| Figure 3 - La résilience vue comme un antonyme de la vulnérabilité..... | 38 |
| Figure 4 - Un modèle conceptuel de risque tenant compte des conditions sociales de production de la connaissance..... | 41 |
| Figure 5 - Un modèle conceptuel, systémique, d'analyse de la « vulnérabilité résilience »)..... | 43 |
| Figure 6 – Le modèle de panarchie, un modèle d'analyse multiscalaire)..... | 46 |
| Figure 7 – Les diagrammes de classes et d'objets | 52 |
| Figure 8 - La représentation synthétique de l'ontologie factuelle appliquée à l'accident de Fukushima | 71 |
| Figure 9 – Les enchaînements d'évènements observés durant la triple catastrophe de Fukushima – mars 2011 | 72 |
| Figure 10 - La représentation graphique du modèle de catastrophe urbaine | 81 |
| Figure 11 – Le module de vulnérabilité humaine | 83 |
| Figure 12 - Le modèle de forces sociales d'Helbing | 88 |
| Figure 13 – Les dynamiques centrifuge et centripète | 90 |
| Figure 14 - Un modèle de panique basé sur les interactions entre populations | 94 |
| Figure 15 - Cas 1 – La diffusion et l'émergence de panique collective | 96 |
| Figure 16 - Cas 2 - La panique n'émerge pas..... | 96 |
| Figure 17 - Cas 3 – La diffusion et l'émergence de panique collective..... | 97 |
| Figure 18 - Cas 4 – La panique n'émerge pas..... | 97 |
| Figure 19 – Les zones cérébrales impliquées dans les réponses comportementales | 101 |
| Figure 20 - La combinaison des connaissances issues des neurosciences et de la géographie des risques | 102 |
| Figure 21 - Les zones de la catastrophe lors d'un tremblement de terre..... | 103 |
| Figure 22 - Une typologie des comportements humains selon la temporalité de la catastrophe | 105 |
| Figure 23 - La formalisation graphique de trois méta-comportements lors de catastrophes..... | 109 |
| Figure 24 - La fonction d'imitation | 113 |
| Figure 25 - Les fonctions phi et gamma..... | 114 |
| Figure 26 – La validation du modèle PCR..... | 116 |
| Figure 27 – La validation du modèle PCR..... | 116 |
| Figure 28 – La localisation des événements tsunamiques de 1610 à 2016 | 123 |
| Figure 29 – La sismicité en zone Ligure durant la période 1980-2010..... | 124 |
| Figure 30 – La localisation du réseau de failles Ligure | 125 |
| Figure 31 - L'identification et la spatialisation des enjeux territoriaux..... | 126 |
| Figure 32 - La répartition de la population dans les Alpes-Maritimes | 127 |
| Figure 33 – La caractérisation d'un risque en fonction d'un aléa et d'une vulnérabilité..... | 127 |
| Figure 34 – L'inondation par submersion marine sur la commune de Nice | 129 |
| Figure 35 – La transposition des résultats sous Google Earth : l'est de Nice sous les eaux en cas de scénario de tsunami extrême | 129 |
| Figure 36 - La cartographie de la vulnérabilité territoriale liée aux délais d'intervention des services de secours sur le littoral azuréen..... | 132 |
| Figure 37 – Les critères de détermination d'un Etablissement à Recevoir du Public à devenir un site refuge..... | 135 |
| Figure 38 – La cartographie des sites refuges pour le scénario de tsunami extrême (S11) sur la commune de Nice | 136 |
| Figure 39 - La cartographie des sites refuges pour le scénario de tsunami extrême (S11) sur la commune de Saint-Laurent-du-Var | 137 |
| Figure 40 – Les différents sites d'enquêtes sur le littoral azuréen – Programme européen ASTARTE..... | 138 |
| Figure 41 - Les comportements envisagés (en %) en cas de baisse soudaine du niveau de la mer | 139 |
| Figure 42 – Les comportements envisagés (en %) en fonction de la zone de résidence des enquêtés (en %)..... | 140 |

| | |
|---|-----|
| Figure 43 – La cartographie de l’extension spatiale des inondations sur les communes de Mandelieu, Biot et Cannes : exposition et vulnérabilité biophysique | 143 |
| Figure 44 - Les axes de circulation coupés entre 22 heures et le milieu de la nuit près de Mandelieu..... | 144 |
| Figure 45 - Le cycle de la prévention et de la gestion de crise adapté aux comportements humains..... | 147 |
| Figure 46 – Quelques exemples de pictogrammes | 153 |
| Figure 47 – Atelier « La terre tremble, comment réagiriez-vous » ? | 155 |
| Figure 48 – Une diversité d’approches d’observation | 164 |
| Figure 49 – L’extraction d’une page de verbatim – Repérage des thèmes à l’aide de code couleur..... | 167 |
| Figure 50 – Les emprises et hauteurs d’eau simulées d’un tsunami à Nice | 171 |
| Figure 51 – L’environnement virtuel construit avec des avatars | 172 |
| Figure 52 – Le scénario de tsunami virtuel..... | 173 |
| Figure 53 – Les zones d’enquête sur le terrain niçois | 174 |
| Figure 54 – La réalisation de la bâche Gulliver – Terrain littoral azuréen..... | 176 |
| Figure 55 – La réalisation de la bâche Gulliver – Terrain bavrais..... | 176 |
| Figure 56 – L’élaboration du protocole d’enquête sur la Promenade des Anglais | 178 |
| Figure 57 – L’extrait d’une vidéo correspondant à un enregistrement d’eye-tracking. La scène visuelle et les mouvements oculaires : la ligne rouge indique la saccade et le cercle rouge indique la fixation..... | 182 |
| Figure 58 – La campagne d’enquêtes eye-tracking à Nice - Heat map d’un enquêté lors de la phase de fuite de la plage..... | 183 |
| Figure 59 – Quatre hypothèses pour tester le rôle de l’information et de la densité de population sur les dynamiques comportementales | 189 |
| Figure 60 – La représentation schématique du modèle PCR..... | 190 |
| Figure 61 – La schématisation de l’implémentation du modèle PCR – EDO dans un réseau spatial..... | 191 |
| Figure 62 – Le croisement de différentes méthodes pour intégrer l’espace dans les modèles | 192 |
| Figure 63 – Le lien entre le réseau de nœuds et la réalité spatiale – Application au terrain de Nice..... | 193 |
| Figure 64 – La construction d’un réseau de nœuds sur la base de la configuration spatiale des plages de Nice.. | 195 |
| Figure 65 - La répartition spatiale des clusters sur le terrain d’enquête de Nice | 196 |
| Figure 66 - Une « carto-fiche » des réactions d’enquêtés SC3 en contexte de tsunami simulé sur le terrain de Nice | 197 |
| Figure 67 – Un réseau simplifié de trois nœuds associés au modèle PCR (Paniqué-Contrôlé-Réflexe)..... | 199 |
| Figure 68 – Des résultats de simulation en fonction de la capacité d’accueil (W) de la place intermédiaire (nœud 2) | 199 |
| Figure 69 – Le rôle de la pression et contre-pression sur les dynamiques comportementales | 201 |
| Figure 70 – Les temps d’évacuation du nœud 1 vers le nœud 3 en passant par le nœud 2..... | 202 |
| Figure 71 – Le développement de la plate-forme (résultats préliminaires) | 204 |
| Figure 72 - Une capture d’écran de l’interface web représentant un réseau de graphes sur la ville de Nice (résultat préliminaire)..... | 205 |
| Figure 73 - Une capture d’écran de l’interface web représentant un réseau de graphes orientés et dynamiques – Application à la ville de Nice (résultat préliminaire) | 205 |
| Figure 74 - Les différents types de zones identifiées par les acteurs | 207 |
| Figure 75 – Vers un modèle opérationnel de résilience..... | 212 |
| Figure 76 - Le modèle stylisé du cycle adaptatif..... | 213 |
| Figure 77 - Le modèle DS3 (Spatial Decision Support System)..... | 214 |
| Figure 78 - Un cadre d’analyse de la résilience..... | 215 |
| Figure 79 – Un paysage de stabilité à trois dimensions avec deux bassins d’attraction | 221 |
| Figure 80 – L’identification du noyau de viabilité pour des exploitations riveraines d’un lac | 222 |
| Figure 81 – Une diversité de théories pour étudier les complexités des risques et catastrophes..... | 224 |

TABLE DES TABLEAUX

| | |
|--|-----|
| Tableau 1 - L'explication du modèle PCR..... | 110 |
| Tableau 2 - La détermination des indicateurs de vulnérabilité de l'enjeu Sécurité civile..... | 131 |
| Tableau 3 - L'évaluation des niveaux de vulnérabilité..... | 131 |
| Tableau 4 - Le profil des enquêtés..... | 138 |
| Tableau 5 – Les canaux de diffusion..... | 151 |
| Tableau 6 – Un exemple de communication..... | 153 |
| Tableau 7 – L'extraction du panel de comportements observés par les acteurs des focus groupes..... | 168 |
| Tableau 8 – Les mises en relation des contextes et des comportements observés..... | 168 |
| Tableau 9 – Les mises en relation des variables de terrain sur l'observation des comportements..... | 169 |
| Tableau 10 – La réalisation de la bande son Tsunami..... | 177 |
| Tableau 11 – L'extraction des données synchronisées..... | 181 |
| Tableau 12 – L'extrait d'une grille d'analyse qui présente l'articulation et la combinaison des informations issues de la bande son, de la bande vidéo, des observations comportementales et du traçage du regard..... | 183 |
| Tableau 13 – Un exemple de descripteurs des comportements humains..... | 186 |

TABLE DES PHOTOGRAPHIES

| | |
|--|-----|
| Photo 1 - Un dispositif anti-intrusion sur la Promenade des Anglais..... | 27 |
| Photo 2 - Ile de Ré, la reconstruction des digues après le passage de la tempête Xynthia, Septembre 2010..... | 31 |
| Photo 3 - Un mouvement de panique collective au stade de football du Heysel, 1985 (Belgique)..... | 89 |
| Photo 4 - Un tsunami d'origine gravitaire sur le littoral azuréen..... | 130 |
| Photo 5 – Une forte fréquentation sur les plages de Nice..... | 136 |
| Photo 6 – Les dommages des véhicules d'intervention..... | 144 |
| Photo 7 – Des maisons vendéennes inondées lors de la tempête Xynthia en 2010..... | 146 |
| Photo 8 – La mise en place de batardeau anti-inondation à Venise..... | 149 |
| Photo 9 – L'incendie de l'usine chimique Lubrizol, Rouen..... | 163 |
| Photo 10 – L'esplanade de la Mer – milieu ouvert (à gauche) - La place basse Oscar Niemeyer (Esplanade du Volcan) - milieu semi-ouvert (à droite) permettant de tester le confinement..... | 175 |
| Photo 11 – Un enquêté dessine les trajectoires de déplacement habituel pour rejoindre la plage..... | 179 |
| Photo 12 – L'installation de l'enquêté sur le terrain..... | 180 |
| Photo 13 – Un enquêté prend la fuite en courant..... | 180 |
| Photo 14 – L'équipement d'un enquêté..... | 184 |
| Photo 15 – L'équipe Com2SiCa avec les étudiants lors des enquêtes au Havre, mai 2019..... | 184 |
| Photo 16 – Des obstacles encombrant les ruelles du Vieux-Nice (à gauche) et d'Istanbul (à droite)..... | 194 |
| Photo 17 - Barcelone, un exemple de ruelles assurant la connexion entre deux places..... | 198 |
| Photo 18 - Atelier de réflexion..... | 208 |
| Photo 19 - Un exemple de résultat d'atelier – Bâche Gulliver Nice Promenade des Anglais..... | 208 |

BIBLIOGRAPHIE

- Adger W.N., 1999, « Social vulnerability to climate change and extremes in coastal Vietnam », *World Development* 27 (2), pp. 249-269
- Adger W.N. et Kelly P.M., 1999, « Social vulnerability to climate change and the architecture of entitlements », *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 4, pp. 253-266
- Adger W.N., 2000, « Social and ecological resilience : Are they related ? », *Progress in Human Geography*, 24(3), pp. 347-364
- Adger W. N., Hughes T. P., Folke C., Carpenter S. R. et Rockstrom J., 2005, « Social-ecological resilience to coastal disasters », *Science*, 309 (5737), pp. 1036-1039
- Adger W.N., 2006, « Vulnerability », *Global Environmental Change*, vol. 16, n° 3, pp. 268-281
- Alexander D. E., 1993, *Natural Disasters*, New York, Chapman & Hall
- Alexander D., 2016, « Préface », in : *Résiliences – Ressemblances dans la diversité*, sous la direction de S. Ionescu, Odile Jacob, Paris
- Allen K., 2003, « Vulnerability Reduction and the Community-based Approach », *Natural Disasters and Development in a Globalising World*, pp. 170-184
- Ambrosio B., Aziz-Alaoui M. A., Phan V. L. E., 2018, « Global attractor of complex networks of reaction-diffusion systems of Fitzhugh-Nagumo type », *Discrete and Continuous Dynamical Systems - B*, 23 (9), pp. 3787-3797
- Antoine J.M., Desailly B. et Gazelle F., 2001, « Les crues meurtrières, du Roussillon aux Cévennes », *Annales de géographie*, n° 622, pp. 597-623
- Anthony E. J., 1987, « Risk, vulnerability and resilience : An overview », in : E. J. Anthony & B. Cohler (Eds.), *The invulnerable child*, pp. 3-48, Guilford : New York
- Arnaud A., Davoine P.A., 2009, « Cartographie des temporalités dans le domaine des risques », *Revue du comité français de cartographie. Le Monde des Cartes*
- Aschan-Leygonie Ch., Cuntly C. et Davoine P.A., 2019, *Les systèmes d'information géographique – Principes, concepts et méthodes*, Armand Colin, Paris
- Aschan-Leygonie Ch., 2000, « Vers une analyse de la résilience des systèmes spatiaux », *L'Espace géographique*, 29(1), pp. 64-77
- Ashley and Carney, 1999, *Sustainable livelihoods : Lessons from early experience*, Department for International Development : London
- Atlan H., 2011, *Le Vivant Post-Génomique ou qu'est-ce que l'auto-organisation ?*, Odile Jacob, Paris.
- Aubin, J.P., 1991, *Viability theory*, Birkhauser, Basel
- Bak P., 1996, *How Nature Works – The science of self-organized criticality*, Springer Verlag

- Balzarini R., 2013, *Approche cognitive pour l'intégration des outils de la géomatique en sciences de l'environnement : modélisation et évaluation*. Thèse de doctorat, sous la direction de M. Ney et co-direction de P.-A. Davoine, Université de Grenoble
- Balzarini R. et Murat, 2016, « The effectiveness of panoramic maps design : a preliminary study based on mobile eye-tracking », *ISPRS Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*
- Bantegnie M., 2015, *Le risque de tsunami sur le littoral azuréen : contribution méthodologique pour la détermination des sites refuges en cas de submersion marine par tsunami d'origine sismique*, Mémoire de Master 2 Systèmes Territoriaux, Aide à la décision, Environnement, UMR Géoazur (réalisé dans le cadre du programme européen Astarte)
- Bargh J.A., Chen M., Burrows L., 1996, « Automaticity of social behavior : direct effects of trait construct and stereotype activation on action », *Journal of personality and Social Psychology*, 71, pp. 230-244
- Barroca B, Serre D. et Youssef D., 2012, « Le concept de résilience à l'épreuve du génie urbain », *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, 12(2)
- Barroca B., DiNardo M. et Mboumoua I., 2013, « De la vulnérabilité à la résilience : mutation ou bouleversement ? », *EchoGéo*, Pôle de Recherche pour l'Organisation et la diffusion de l'Information Géographique
- Barroca B., 2014, « Behind The Barriers : A Resilience Conceptual Model », SAPIENS
- Barroca B., 2018, *Résilience urbaine : Une venelle entre impasse et avenue(e)*, mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, soutenu à l'Université Paris Est
- Barsky L., Trainor J. et Torres M., 2006, « Disaster realities in the aftermath of Hurricane Katrina : Revisiting the looting myth. », *Natural Hazards Center Quick Response*, Report Number 184
- Baumann D.D. et Sims J.H., 1974, « Human response to the hurricane », in : White G.F. (ed.), *Natural hazards : local, national, global*, New York, Oxford University Press
- Becerra, S., Peltier, A., (eds), 2009, *Risques et environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés*, Paris : L'Harmattan
- Becerra S., Peltier A., Antoine J.M., Labat D., Chorda J., Ribolzi O., Daupras F., Dartus D., 2013, « Comprendre les comportements face à un risque modéré d'inondation. Etude de cas dans le périurbain toulousain (Sud-Ouest de la France) », *Hydrological Sciences Journal*, Taylor & Francis, vol. 58, pp. 945-965.
- Beck E., Weber C. et Granet M., 2006, « Etude multirisque en milieu urbain et SIG », *Revue Internationale de Géomatique/European Journal of GIS and Spatial Analysis*, vol.16, n°3-4, pp. 395-414
- Benkirane R., 2002, *La Complexité, vertiges et promesses : 18 histoires de sciences*, Le Pommier, Paris

- Beraud H., Barroca B. et Hubert G., 2012, « La résilience aux inondations du réseau de gestion des déchets », *Journées scientifiques de l'Environnement*, Créteil, France.
- Bergen T., 2016, *Analyse des inondations azuréennes du 3 oct 2015 : de l'évènement climatique à ses impacts territoriaux*, Rapport Licence 3, Université de Nice-Sophia Antipolis
- Berthoz S. et Grèzes J., 2011, « Les émotions, fondement du sens moral », *L'essentiel Cerveau et Psycho : Les émotions au pouvoir*, n° 7, août-octobre 2011, pp. 20-24
- Beucher S. et Reghezza M., 2005, *Les risques*, Paris, Bréal, collection Amphi géo
- Beucher S., Meschinet de Richemond N., Reghezza M., 2008, « Les territoires du risque. Exemple du risque inondation », *Historiens et géographes*, n° 403, pp. 103–111
- Birkland Th., 2010, Federal disaster policy – Learning, priorities and prospects for resilience, pp.106-128 in : Comfort L. *et al.*, 2010, *Designing resilience - Preparing for Extreme Events*, Univ. of Pittsburgh Press, Pittsburgh (USA).
- Birkmann J., 2006, « Measuring vulnerability to promote disaster-resilient societies : Conceptual frameworks and definitions », in Birkmann J. (eds.), *Measuring Vulnerability to Natural Hazards – Towards Disaster Resilient Societies*, Hong-Kong, New York, United Nations University Press, pp. 7-54
- Blaikie P., Cannon T., Davis I., et Wisner B., 1994, *At risk*, Routledge, Londres
- Bolay J. C., 1994, *Urbanization and environment : wich sustainable housing for the poors of Latin America*, Lausanne, IREC/EPFL, 39 p.
- Bommel P. et Müller J.P., 2007, An introduction to UML for modelling in the human and social sciences, in : D. Phan et F. Amblard, *Agent-based modelling and simulation in the social and human sciences*, Bardwell Press : Oxford, pp. 273-294
- Bonnet E., 2002, *Risques industriels : évaluation des vulnérabilités territoriales*, Thèse de doctorat, Université du Havre
- Booch G., Rumbaugh J., et Jacobson I., 1999, *The unified modeling language user guide*, Reading, MA : Addison-Wesley
- Boschetti L., 2013, *Analyse des aléas et de la vulnérabilité des espaces littoraux azuréens au risque de submersion marine par tsunami*, Mémoire de Master 2, UMR Géoazur
- Boschetti L., Provitolo D. et Tric E., 2017, « La ville de Nice face aux risques soudains et à dynamique rapide : l'exemple de la submersion marine par tsunami », *ThéoQuant*, Besançon, 19 mai 2017
- Boschetti L., Provitolo D., Tric E., *et al.*, 2019, « The Mediterranean French coastal exposed to tsunami risk : from hazard to territorial vulnerability studies », *AAG Washington*, April 3-7
- Boudoukha, A. H., 2016, *Burn-out et stress post-traumatique*, Dunod, Paris
- Boudoukha, A. H., Przygodzki-Lionet, N., et Hautekeete, M., 2016, « Traumatic events

and Early Maladaptive Schemas (EMS) : Prison guard psychological vulnerability », *European Review of Applied Psychology*, 66(4), pp.181-186

Bourcart L., 2015, *Émergence et usages du concept de résilience dans les mondes académique et institutionnel*, Thèse de doctorat, Science politique. Université Grenoble Alpes

Bourque L. et Russell L., 1994, *Experiences During and Responses to the Loma Prieta Earthquake*, Governor's Office of Emergency Services

Bousquet F., Botta A., Alinovi L., Barreteau O., Bossio D., Brown K., Caron P., Cury P., D'Errico M., DeClerck F., Dessard H., Enfors Kautsky E., Fabricius C., Folke C., Fortmann L., Hubert B., Magda D., Mathevet R., Norgaard R. B., Quinlan A., et Staver C., 2016, Resilience and development : mobilizing for transformation, *Ecology and Society*, 21(3)

Boyd S.T., 1981, « Réactions psychologiques des victimes de catastrophes », *South african Medicine Jal.*, n° 60, pp. 744-748

Brooks N., 2003, *Vulnerability, Risk and Adaptation : A Conceptual Framework*, Tyndall Center for Climate Change Research, working paper 38

Brosch T. et Sander D., 2011, « Les effets cognitifs des émotions », *L'essentiel Cerveau et Psycho : Les émotions au pouvoir*, N° 7, août-octobre 2011, pp. 68-74

Budiarjo A., 2006, *Evacuation Shelter Building Planning for Tsunami-prone Area : a Case Study of Menulaboh City. Indonesia*, Thesis, International Institute for Ge-information science and Earth Observation Enschede, the Netherlands

Buessler S. et Weber Ch., 2016, « Energie et acteurs : application de la méthode des graphes aux acteurs alsaciens », *Cybergeo : European Journal of Geography*

Burby R.J., 2006, Hurricane Katrina and the Paradoxes of Government Disaster Policy : Bringing About Wise Governmental Decisions for Hazardous Areas, *The ANNALS of the American Academy of Political and Social Science*, Volume : 604 issue : 1, pp. 171-191

Burton I., Saleemul H., Lim B., Pilifosova O. et Schipper E. L., 2002, « From impacts assessment to adaptation priorities : the shaping of adaptation Policy », *Climate Policy*, 2 (2-3), pp. 145-159

Cantin G., Verdière N., Lanza V., M. A. Aziz-Alaoui, Charrier R., Bertelle C., Provitolo D. et Dubos-Paillard E., 2016, « Mathematical Modeling of Human Behaviors During Catastrophic Events : Stability and Bifurcations », *Inter. J. of Bifurcation and Chaos*, 26(10).

Carrasco T., Cireau B., 2014, *Contribution à la planification des évacuations en cas d'alerte tsunami sur les villes de Tanger et Syracuse (Projet Européen ASTARTE)*, Mémoire de Master, département de Géographie Aménagement, Université Montpellier III – Paul Valéry, sous la direction de F. Leone et F. Lavigne

Carter T. R., Parry M. L., Nishioka S., Harasawa H., 1994, « Report of Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change », *Technical Guidelines for Assessing Climate Change Impacts and Adaptations* University College London and Centre for Global Environmental Research, London, UK and Tsukuba, Japan

- Castagnola F., 2017, *Epreuve de sensibilisation à la conscience du risque et la gestion de crise, Module IMPACT*, Diplôme Universitaire de Conseiller en management des Risques.
- Cepri, 2009, *Un logement « zéro dommage » face au risque d'inondation est-il possible ?*
- Cepri, 2010, *Le bâtiment face à l'inondation, diagnostiquer et réduire sa vulnérabilité*, Guide méthodologique
- Cepri, 2013, *Evaluation des Dispositifs Réglementaires sur le Risque Inondation et la Sensibilisation - Quelle information préventive pour des populations aux comportements adaptés ?* Editeur Cepri
- Chamussy H., Guerin J.P., Le Berre M., Uvietta P., 1984, « La dynamique de systèmes : une méthode de modélisation des unités spatiales, *Espace géographique*, tome 13, n°2, pp. 81-93
- Chandessais C., 1979, Un nouveau domaine de recherche : les comportements associés aux catastrophes, *Le travail humain*, n° 42
- Charpentier C., 2014, *Perception et représentation du risque de tsunami à Nice*, Mémoire de Master 1, Spécialité EDMR, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne (réalisé dans le cadre du programme européen ASTARTE)
- Châtaignier J.M., 2014, *Fragilités et résilience – Les nouvelles frontières de la mondialisation*, Edition Karthala, Paris
- Clark W.C., 1986, « Sustainable development of the biosphere : themes for a research program », in : Clark W.C., Munn R.E. (eds), *Sustainable development of the biosphere*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 5-48
- Cœur D., 2008, *La plaine de Grenoble face au risque d'inondation – Genèse d'une politique publique du XVII^e au XX^e siècle*, Editions Quae, Versailles
- Colombo R.M., Goatin P. et Rosini M.D., 2010, A macroscopic model for pedestrian flows in panic situations, *Gakuto Internat. Ser. Math. Sci. Appl.*, 32, pp. 255-272
- Combres E., 1994, « La modélisation des mouvement de foule », *Sécurité, sciences et techniques*, nov. 1994, pp. 15-22
- Comfort L., Boin A. et Demchack C., 2010, *Designing resilience - Preparing for Extreme Events*, Univ. of Pittsburgh Press, Pittsburgh (USA).
- Commission océanographique intergouvernementale, 2008, *Préparation au tsunamis. Guide d'informations à l'intention des responsables de la planification en cas de catastrophe*, Unesco, COI
- Corson N., Aziz-Alaoui M.A., Ghnemat R., Balev S. et Bertelle C., 2012, « Modelling the Dynamics of Complex Interaction Systems : from Morphogenesis to Control », *Internat. J. of Bifurcation and Chaos*
- Cour des Comptes, 2012, *Les enseignements des inondations de 2010 sur le littoral atlantique (Xynthia) et dans le Var*, Paris, www.ccomptes.fr
- Cranefield S., Purvis M., 1999, « UML as an ontology modelling language », *Proc. of the*

Workshop on Intelligent Information Integration, 16th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-99)

Crocq L., 1994, « La psychologie des catastrophes et des blessés psychiques », in : Noto R., Huguenard P. et Larcan A. (eds.), *Médecine de catastrophe*, Paris, Masson

Crocq L., Doutheau C., Louville P., et Cremniter D., 1998, « Psychiatrie de catastrophe. Réactions immédiates et différées, troubles séquellaires. Panique et psychopathologie collective », *Encyclopédie méd.-chir.*, Psychiatrie

Crocq L., 2013, *Les paniques collectives*, Odile Jacob, Paris

Cross, J.A., 2001, « Megacities and small towns : different perspectives on hazard vulnerability », *Global Environmental Change Part B : Environmental Hazards* 3 (2), pp. 63-80

Cutter S. L., Mitchell, J T. et Scott, M. S., 2000, « Revealing the vulnerability of people and places : a case study of Georgetown country, SouthCalifornia », *Annals of the Association of American Geographers*, 90 (4), pp. 713-737

Cutter S. L., Boruff B. J., Shirley W. L., 2003, « Social vulnerability to environmental hazards », *Social Science Quarterly*, 84 (1), pp. 242-261

Cutter S. L., Mitchell, J. T., Scott M. S., 2004, « Revealing the Vulnerability of People and Places : A Case Study of Georgetown County, South Carolina », *Annals of the Association of American Geographers*

Cutter S.L., Barnes L., Berry M., Burton Ch., Evans E., Tate E. et Webb J., 2008, « A place-based model for understanding community resilience to natural disasters », *Global Environmental Change* 18, pp. 598–606

Cyrulnik B., 2001, *Les vilains petits canards*, Odile Jacob, Paris

Cyrulnik B., 2002, *Un merveilleux malheur*, Odile Jacob, Paris

Damasio A., 2005, *Spinoza avait raison : Joie et tristesse, le cerveau des émotions*, Odile Jacob, Paris.

Daudé E., Tranouez P. et Langlois P., 2009, « A multiagent urban traffic simulation. Part II : dealing with the extraordinary », ICCSA 2009, The 3rd International Conference on Complex Systems and Applications

Dauphiné A., 2003, « Les réseaux urbains : un exemple d'application de la théorie des systèmes auto-organisés critiques », *Annales de Géographie*, t. 112, n°631, pp. 227-242

Dauphiné A., 2003, *Les théories de la complexité chez les géographes*, Economica, Paris

Dauphiné A. et Provitolo D., 2003, « Les catastrophes et la théorie des systèmes auto-organisés critiques », pp. 22-36, in : *Les risques /* sous la direction de V. Moriniaux. Éditions du Temps, Nantes

Dauphiné A. et Provitolo D., 2007, « La résilience : un concept pour la gestion des risques », *Annales de Géographie*, n°654, pp.115–125

- Dauphiné A., 2011, *Géographie fractale : fractals auto-similaire et auto-affine*, Hermès / Lavoisier, Paris
- Dauphiné A. et Provitolo D., 2013, *Risques et catastrophes – Observer, spatialiser, comprendre, gérer*, A. Colin (2^{ème} édition), Collection U, Paris
- Davoine P.A., 2014, *Contributions Géomatiques pour la Gestion des Risques Naturels : modélisation, géovisualisation, acquisition*, Habilitation à Diriger des Recherche, Université de Grenoble
- Davoine P.-A., Poulenard L., Gueguen Ph., Gensel J., 2013, « Dispositif mobile et géoweb pour la collecte de données d'inventaire sismique du bâti en milieu urbain : l'application Isibat », *Conférence Internationale de Géomatique et Analyse Spatiale*, SAGEO, Brest, 23-26 Septembre 2013
- Décamps H., 2007, « La vulnérabilité des systèmes socioécologiques aux événements extrêmes : exposition, sensibilité, résilience », *Natures Sciences Sociétés*, Vol. 15, pp. 48-52.
- Deffuant G. et Gilbert N., 2011, *Viability and Resilience of Complex Systems – Concepts, Methods and Case Studies from Ecology and Society*, Springer, Verlag, Berlin Heidelberg
- Deneubourg J-L., 2002, « Emergence et insectes sociaux », p. 99-117, in : *La complexité, vertiges et promesses*, sous la direction de Réda Benkirane, Le Pommier, Paris
- Denis-Remis C., 2007, *Approche de la maîtrise des risques par la formation des acteurs*, Thèse sous la direction de J.L. Wybo, École Nationale Supérieure des Mines de Paris
- Désautels J. et Larochelle M., 1989, *Qu'est ce que le savoir scientifique, Points de vue d'adolescents et d'adolescentes*, Presses de l'Université Laval, Québec
- Dewi R.S., 2010, *A GIS-Based Approach to the Selection of Evacuation Shelter Building and Routes for Tsunami Risk Reduction : a case Study of Cilacap Coastal Area, Indonesia*, Thesis, Gadjah Mada University, University of Twente
- Djament-Tran G. et Reghezza-Zitt M., (dir.), 2012, *Résilience urbaines. Les villes face aux catastrophes*, éditions Le Manuscrit, collection Fronts pionniers, Paris
- Donnadieu G. et Karsky M., 2002, *La systémique, penser et agir dans la complexité*, Edition Liaison, Paris
- Dortier J.F., 2014, « L'intelligence collective. Mythes et réalités », in : *Le cerveau et la pensée – Le nouvel âge des sciences cognitives*, Eds. J.F. Dortier, Sciences Humaines Editions, Auxerre
- Dollfus, 1992, « Système Monde et système Terre », *L'espace géographique*, tome 21, n°3, pp. 223-229
- Dubos-Paillard E. et Provitolo D., 2012, « Analysis of the 2011 Japan's triple disaster from a conceptual ontology of the domain of risk and disaster », *Complex System and Design Management*, Actes colloque, décembre 2012, Paris

- Dubois J.L. et Ouattara M., 2014, « Vous avez dit résilience ? Eléments conceptuels et politiques publiques », pp. 35-51, in : *Fragilités et résilience – Les nouvelles frontières de la mondialisation*, sous la direction de J.M. Châtaigner, Edition Karthala, Paris
- Dupuy J.P., 1991a, « Sur la complexité du social », in : *Les Théories de la complexité – Autour de l'oeuvre d'Henri Atlan*, sous la direction de F. Fogelman-Soulié, Editions du Seuil Paris.
- Dupuy J.P., 1991b, *La Panique*, Les empêcheurs de tourner en rond, Paris.
- Durand M., Béraud H., Bahers J.B, Barroca B. et Bonierbale Th., 2015, « L'application du principe de proximité dans la gestion des déchets : divergence d'enjeux sociaux, techniques et environnementaux », *International conferences on proximity - Building proximities in a global world: Territorial, organisational and societal challenges*, Université François Rabelais de Tours, May 2015, Tours, France
- Duval R. et Vogel L., 2008, « Economic resilience to shocks : The role of structural policies », *OECD Journal : Economic Studies*, vol. 2008, issue 1, pp. 1-38
- Drury et Reicher, 2011, « Des foules solidaires », *Cerveau et Psycho : Les émotions au pouvoir*, N° 43, janvier 2011
- D'Ercole R. et Metzger P., 2009, « La vulnérabilité territoriale : une nouvelle approche des risques en milieu urbain », *Cybergeo : European Journal of Geography*, n° 447
- D'Ercole R. et Metzger P., 2003, « Enjeux majeurs et lieux essentiels : proposition méthodologique pour une meilleure prévention des risques », *Actes du VIe Colloque National AFPS 2003* (Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, 1-3 juillet 2003), Vol.3, Ecole Polytechnique, pp. 259-266
- Etienne M, 2003, « Sylvopast : a multiple target role-playing game to assess negotiation processes in sylvopastoral management planning », *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 6(2)
- Fabiani J.L. et Theys J., 1987, *La société vulnérable*, Presses de l'Ecole Normale Supérieure, Paris
- Festinger L., 1954, « A Theory of Social Comparison Processes », *Human Relations*, 7, pp. 117-140
- Fischer H.E, 1998, *Response to Disaster*, Lanham, Maryland, University Press of America
- Folke C., Carpenter S.R., Elmqvist T., Gunderson L.H., Holling C.S., Walker B.H., Bengtsson J., Berkes F., Colding J., Danell K., Falkenmark M., Gordon L., Kaspersson R., Kautsky N., Kinzig A., Levin S.A., Mäler K.-G., Moberg F., Ohlsson L., Olsson P., Ostrom E., Reid W., Rockström J., Savenije S., Svedin U., 2002, « Resilience and Sustainable Development : Building Adaptive Capacity in a World of Transformations », *Science Background Paper commissioned by the Environmental Advisory Council of the Swedish Government in preparation for the World Summit on Sustainable Development*

- Folke C., Carpenter S.R., Walker B.H., Scheffer M., Elmqvist T., Gunderson L.H., Holling C.S, 2004, « Regime shifts, resilience and biodiversity in ecosystem management », *Annual Review in Ecology, Evolution and Systematics*, 35, pp. 557-581
- Folke C., 2006, « Resilience : The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses », *Global Environmental Change*, Vol. 16, Issue 3, pp. 253-267
- Foussekis P., 2019, *Analyse des données spatio-temporelles de la campagne Eye-tracking : Enquêtes relatives aux comportements humains*, Mémoire de Master 1, UMR Géoazur et UMR ESPACE
- Friedman M. et Friedman R., 1981, *Free to Choose. A Personal Statement*, New York, Avon, (*La liberté du choix*, trad. de l'angl. par Guy Casaril, Paris, Belfond, 1980)
- Füssel H.-M., 2007, « Vulnerability : A Generally Applicable Conceptual Framework for Climate Change Research », *Global Environmental Change*, 17(2), pp.155-167
- Gabert P., 1996, « Les inondations d'origine urbaine à Aix-en-Provence des 22 et 23 septembre 1993 », *Revue d'Analyse Spatiale Quantitative et Appliquée*, n° 38-39, pp. 225-238
- Gaimard M., Gateau M. et Ribeyre F., 2018, *Vulnérabilité et territoires*, Kairos, Nancy
- Gallopín G.C., 2003, « *A systemic synthesis of the relations between vulnerability, hazard, exposure and impact, aimed at policy identification* », Handbook for Estimating the Socio-Economic and Environmental Effects of Disasters, Economic Commission for Latin American and the Caribbean (ECLAC), ECLAC, LC/MEX/G.S., Mexico
- Gallopín G.C., 2006, « Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity », *Global Environmental Change*, vol. 16, pp. 293–303
- Garbolino E. et Michel P., 2011, « Proposal of a Spatial Decision Support System architecture to estimate the consequences and costs of small meteorites impacts », *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, pp. 3013-3021
- Garbolino E., Lachtar D., Sacile R., Bersani C., 2013, « Vulnerability and Resilience of the Territory Concerning Risk of Dangerous Goods Transportation (DGT) : Proposal of a spatial Model », *Chemical Engineering transactions*, 32, pp. 91-96.
- Genin D. et Mazurek H., 2016, « La résilience des systèmes socioécologiques : d'une intuition holiste à une difficile conceptualisation et mise en œuvre », pp. 63-92, in : *Résilience – Ressemblances dans la diversité*, sous la direction de S. Ionescu, Odile Jacob, Paris
- George N. et Gamond L., 2011, « Premières impressions », *L'essentiel Cerveau et Psycho : Les émotions au pouvoir*, N° 7, août-octobre 2011.
- Ghiotti S., 2006, « Les Territoires de l'eau et la décentralisation. La gouvernance de bassin versant ou les limites d'une évidence », *Territoires et développement durable*, <http://developpementdurable.revues.org/document1742.html>.
- Godard O., Henry C., Lagadec P., Michel-Kerjan E., 2002, *Traité des nouveaux risques*, Gallimard, Paris

- Gould P., 1992, « Epidémiologie et maladie », in : *Encyclopédie de la géographie*, Economica Paris
- Gordon, J.E., 1978, *Structures*, Penguin Books, Harmondsworth, UK
- Granche D., Lavigne F., et al., 2014, *Habiter en Europe, un littoral exposé aux tsunamis. Perceptions, représentations et attitudes des populations littorales*, Premiers résultats de l'enquête ASTARTE
- Granger G.G., 1988, *Pour la connaissance philosophique*, Odile Jacob, Paris
- Greenbaum C. W. et Auerbach J.G., 1992, « The conceptualization of risk, vulnerability, and resilience in psychological development », in : C. W. Greenbaum & J. G. Auerbach (Eds.), *Longitudinal studies of children at psychological risk : Cross-national perspectives*, pp. 9-28, Ablex : Norwood, NJ
- Grewal D. et Salovey P., 2011, « L'intelligence émotionnelle », *L'essentiel Cerveau et Psycho : Les émotions au pouvoir*, n° 7
- Grüber T.R., 2005, « Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing », *International Journal of Human-Computer Studies*, Volume 43(5-6), pp. 907-928
- Guilhou X. et Lagadec P., 2006, « Katrina - Quand les crises ne suivent plus le script », *Préventique-Sécurité*, n° 88, juillet-août 2006, pp. 31-33
- Gunderson, L. et Holling, C.S., (eds), 2002, « *Panarchy : Understanding Transformations in Human and Natural Systems* », Island Press, Washington, DC.
- Hadfield P., 1992, *Tokyo séisme : 60 secondes qui vont changer le monde*, Ed. Autrement, Paris
- Hatfield E., Cacioppo J.T., Rapson R.L., 1994, *Emotional Contagion*, Cambridge, Cambridge University Press
- Hagenauer J., Helbich M. Leitner M., 2011, « Visualization of crime trajectories with self-organizing maps : a case study on evaluating the impact of hurricanes on spatio-temporal crime hotspots », *25th Conference of the International Cartographic Association*, Paris, 3-8 July 2011
- Heyman B.N., Davis C. et Krumpal P. F., 1991, « An assessment of worldwide disaster vulnerability », *Disaster Management*, vol. 4, pp. 3-14
- Helbing D., Molnar P., 1995, « Social force model for pedestrian dynamics », *Physical Review E*, Vol. 51, pp. 4282-4286
- Helbing D., Farkas I. et Vicsek T., 2000, « Simulating dynamical features of escape panic », *Nature*, n°407, pp. 487-490
- Helbing D., Farkas I.J., Molnar P. et Vicsek T., 2002, « Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations », in : *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, M. Schreckenberg and S. D. Sharma, (Eds.), Springer, Berlin, pp. 21-58

- Holling, C.S, 1973, « Resilience and stability of ecological systems », *Ann. Rev. of Ecol. and Syst.*, vol. 4, pp.1-23
- Holling C.S., 2001, « Understanding the complexity of economic, ecological and social systems », *Ecosystems*, vol. 4, pp. 390-405
- Hollnagel E., Woods D. D. et Leveson N., 2006, *Resilience Engineering : Concepts and Precepts*, Aldershot, UK : Ashgate Publishing Limited
- ISI, 2012, *Rapport Sécurité des personnes, comportement humain / Annexe 3 – Comportement humain face aux incendies et autres situations de danger*, Projet National Ingénierie de la Sécurité Incendie
- Ionescu S., 2016, *Résilience – Ressemblances dans la diversité*, Odile Jacob, Paris
- Ioualalen M., Larroque C., Scotti O. et Daubord C., 2014, « Tsunami Mapping Related to Local Earthquakes on the French-Italian Riviera (Western Mediterranean) », *Pure and Applied Geophysics*, 171, pp. 1423-1443
- Israel G., 2000, *Le jardin au noyer – Pour un nouveau rationalisme*, Eds du Seuil, Paris
- Israel G., 1998, *La mathématisation du réel*, Eds du Seuil, Paris
- Janis L.I., 1951, *Air war and emotional stress : psychological studies of bombing and civilian defense*, New York, McGraw-Hill
- Jeady H.P., 1981, *La panique*, Ed. Galilée, Paris
- Jouen L., 2018, *Contribution au développement de l'interface Web d'un géoportail pour l'analyse et la simulation comportementale des populations lors d'une situation de catastrophe*, rapport de stage, Université du Havre, LITIS, encadrant : R. Charrier
- Journé B., 2001, « Quelles stratégies pour gérer la sûreté ? Le cas des centrales nucléaires françaises », *Xième Conférence de l'Association Internationale de Management Stratégique*, 13-15 juin 2001, Québec
- Kant J.D., 2012, « Apports de l'informatique et des mathématiques pour la modélisation en sciences humaines et sociales », *Mathématiques et Sciences Humaines*, Centre de Mathématique Sociale et destatistique, EPHE, pp. 47-64
- Kaplan H. B., 1999, « Toward an understanding of resilience : A critical review of definitions and models », in : M. D. Glantz & J. L. Johnson (Eds.), *Resilience and development*, pp. 17-83, Kluwer Academic/Plenum : New York
- Kasperson J.X. et Kasperson R.E., 2001, International Workshop on Vulnerability and Global Environmental Change, *SEI Risk and Vulnerability Program Report*
- Kermack W.O et McKendrick A.G., 1927, « Contribution to the mathematical theory of epidemics », *Proceedings of the Royal Statistical Society*, vol. 115, pp. 700-721
- Kervern G.Y., 1995, *Éléments fondamentaux des cindyniques*, Économica, coll. « Gestion Poche », Paris

- Kiefer P., Giannopoulos I., Raubal, M., et Duchowski, A.T., 2017, « Eye Tracking for Spatial Research : Cognition, Computation, Challenges », *Spatial Cognition and Computation*, 17(1-2)
- Klein R.J.T., Nicholls R.J., Thomalla F., 2003, « Resilience to Natural Hazards : How Useful is the Concept ? », *Environmental Hazards*, vol. 5, n° 1–2, pp. 35-45
- Laborit H., 1994, *La légende des comportements*, Paris, Flammarion
- Lagadec P., 2010, « De nouveaux concepts pour des risques émergents », in : Cros Gaultier-Gaillard, Harter, Pech, *Catastrophes et risques urbains : Nouveaux concepts, nouvelles réponses*, Lavoisier, Paris
- Lallau B., 2014, « Qu'est-ce qu'un ménage résilient ? Concepts, méthodes, illustrations », pp. 149-170, in : *Fragilités et résilience – Les nouvelles frontières de la mondialisation*, sous la direction de J.M. Châtaigner, Edition Karthala, Paris
- Lalo A., 1999, « 9 novembre 1992 : accident majeur à l'usine Total à la Mède : les leçons à tirer pour l'information du public », *Print Industrie*, tome 1, n°18
- Lamarre D. (eds), 2002, *Les risques climatiques*, Belin, Paris
- Lambert J., Terrier M., Pedreros R., 2013, « L'évaluation du risque de tsunamis sur le littoral français », *Géosciences*, BRGM, pp. 54-63
- Landau B. et Diab Y., 2017, *Résilience, vulnérabilité des territoires et génie urbain*, Les Presses des Ponts, Paris
- Laneyrie-Dagen N., 1994, *Les grandes tragédies*, Larousse, Paris
- Lanza V., Corinto F, Gilli M., 2012, « Localized oscillations in diffusively coupled cyclic negative feedback systems », *Internat. J. of Bifurcation and Chaos*
- Larroque C., 2009, *Aléa sismique dans la région intraplaque à sismicité modérée : la jonction Alpes-Bassin Ligure*, HDR Université de Nice – Sophia Antipolis
- Larroque C., Mercier de Lépinay B. et Migeon S., 2011, « Morphotectonic and fault-earthquake relationships along the northern Ligurian margin (Western Mediterranean) based on high resolution multibeam bathymetry and multichannel seismic-reflection profiles », *Marine Geophysical Researches*, 32, pp. 163-179.
- Larroque C., Scotti O. et Ioualalen M., 2012, « Reappraisal of the 1887 Ligurian earthquake (western Mediterranean) from macroseismicity, active tectonics and tsunami modelling », *Geophysical Journal International*, vol. 190, n°1, pp. 87–104
- Le Bon G., 1895, *Psychologie des foules*, Presses Universitaires de France, Paris
- Le Blanc A et Zwarterook I., 2013, « La résilience – Introduction à la résilience territoriale : enjeux pour la concertation », *Les Cahiers de la sécurité industrielle*, n°10.
- Leboeuf A., 2014, *La résilience, un objectif paradoxal pour la sécurité*,

- Le Duff M., Dumas P., Sabinot C. et Allenbach M., 2016, « Le risque tsunami en Nouvelle-Calédonie : Évolutions des facteurs de vulnérabilités et de résiliences à Lifou en territoire coutumier kanak », *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, Vol. 16, n°3
- Legéard B., 2000, *Prévention des inondations torrentielles méditerranéennes – Approche multi-agents pour l'aide à la gestion spatialisée de crise*, Thèse de doctorat en géographie, Université Joseph Fourier, Grenoble, 148 p.
- Le Moigne J.L., 1990, *La modélisation des systèmes complexes*, Dunod, Paris
- Le Moigne J.L., 1977, *La théorie du système général, Théorie de la modélisation*, PUF, Coll. Systèmes – Décisions, Paris
- Leone F., Péroche M., Lagahé E., Gherardi M., Sahal A., Vinet F., Hachim S. et Lavigne F., 2013, « Modélisation de l'accessibilité territoriale pour l'aide à la gestion de crise tsunami (Mayotte, France) », *Annales de géographie*, 693(5), pp. 502-524
- Leveson N., Dulac N., Zipkin D., Cutcher-Gershenfeld, Carroll J., et Barrett B., 2006, « Engineering Resilience into a Safety-Critical System », in : E. Hollnagel, D. D. Woods & N. Leveson (Eds.), *Resilience Engineering : Concepts and Precepts*, Aldershot, UK : Ashgate Publishing Limited
- Lhomme S., 2012, « Les réseaux techniques comme vecteur de propagation des risques en milieu urbain - Une contribution théorique et pratique à l'analyse de la résilience urbaine », thèse de doctorat, Université Paris-Diderot - Paris VII
- Lim B. et Spanger-Siegfried E., 2005, *Adaptation Policy Framework for Climate Change : Developing Strategies, Policies and Measures*, UNDP and GEF, Cambridge University Press : Cambridge
- Livet P., Phan D., Sanders L., 2014, « Diversité et complémentarité des modèles multi-agents en sciences sociales », *Revue Française de Sociologie*, 55,4, pp. 689-729
- Lopes J., 2014, *Gestion du risque de tsunami à Nice et modalités d'évacuation*, Mémoire de Master 1, Spécialité EDMR, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne (réalisé dans le cadre du programme européen ASTARTE)
- Lozi R., Pogonin V.A., Pchelintsev A.N., 2016, « A new accurate numerical method of approximation of chaotic solutions of dynamical model equations with quadratic nonlinearities », in : *Chaos, Solitons and Fractals*, pp. 108-114, Elsevier
- Lozi R. et Provitolo D., 2018, « Topological analysis of a weighted panic control reflex model in the context of terrorist attack », *International Symposium on Computational Science and its Applications*, Feb 5-6, 2018, Sharda University, Greater Noida, India
- Lozi R., Provitolo D., Tric E., 2019, « Assessing the importance of town configuration on crowd evacuation dynamics in the course of terrorist attack, using a dynamical model », *Mendel 2019, 25th International Conference on Soft Computing*, July 10-12, Brno, Czech Republic

- Luthar S. S., Cicchetti D., et Becker B., 2000, « The construct of resilience : A critical evaluation and guidelines for future work », *Child Development*, 71(3), pp. 543–562
- MacCarl Nielsen J. 1976, « Crowding models, stressand wildness », *Mas Emergencies*, 1, pp. 249-260
- MacNally, R. K., S.-W. Lee, S. Yavagal et W.-N. Xiang, 2007, « Learning the critical infrastructure interdependencies through an ontology-based information system », *Environment and Planning B : Planning and Design*, vol. 34, pp. 1103-1124
- Magnan A., 2009, *La vulnérabilité des territoires littoraux au changement climatique : mise au point conceptuelle et facteurs d'influence*, Paris : Iddri Analyses
- Maif, *Catastrophes naturelles, les bons réflexes*, Prévenir les risques naturels, site : <https://www.maif.fr/>
- Marcus A. et Nichols M, 1999, « One the Edge : Heeding the Warnings of unusual events », *Organization Science*, Vol.10, n°4, July-August 1999, pp. 482-499.
- Maret I. et Cadoul T., 2008, « Résilience et reconstruction durable : que nous apprend La Nouvelle-Orléans ? », *Annales de géographie*, 663, pp. 104-124
- Martin S., 2005, *La résilience dans les modèles de systèmes écologiques et sociaux*, Thèse de doctorat en Mathématiques appliquées, Ecole Normale Supérieure, Cachan
- Maskrey A., 1993, *Los desastres no son naturales*, La RED -ITDG Tercer Mundo Editores
- Mathevet R., et Bousquet F., 2014, *Résilience et environnement - Penser les changements socio-écologiques*, Buchet-Chastel, Paris
- Mathieu J.P., 1991, *Dictionnaire de physique*, Masson, Paris
- Maurry B. et Venel J., 2011, « A discrete contact model for crowd motion », *ESAIM : M2AN*, Vol. 45, n°. 1, pp. 145-168
- Mazurek H., 2017, Resilience-based practices in the Field of Society and Nature, Symposium International RESILIO, Bucharest, Roumanie, 27-29 octobre 2017
- Menoni S., 2001, « Chains of damages and failures in a metropolitan environment : some observations on the Kobe earthquake in 1995 », *Journal of Hazardous Materials*, 86, pp. 101-119
- Merad M., Dechy N., Dehouck L. et Lassagne M., 2016, *Risques majeurs, incertitudes et décisions. Approche pluridisciplinaire et multisectorielle*, MA Editions – ESKA, Paris
- Mileti D. S. and O'Brien P., 1991, *Public Response to the Loma Prieta Earthquake Emergency and Aftershock Warnings : Findings and Lessons*, Fort Collins, Colorado State University, Hazards Assessment Laboratory
- Mintzberg H., 1988, « Generic strategies : toward a comprehensive framework », in : R. Lamb et P. Shrivastava (eds.), *Advances in Strategic Management*, JAI Press, vol. 5, pp. 1-67

- Mintzberg H., 2004, *Grandeur et décadence de la planification stratégique*, Dunod : Paris, Paru en 1994 sous le titre *The Rise and Fall of Strategic Planning*, The Free Press.
- Mitchell J. K. (eds), 1999, *Crucibles of Hazard: Disasters and Megacities in Transition*, Tokyo, New York, Paris : United Nations University Press
- Mitchell M., 1998, *An Introduction to Genetic Algorithms*, MIT Press
- Montello D.R., 2002, Cognitive map-design research in the twentieth century : theoretical and empirical approaches, *Cartography and Geographic Information Science*, 29 (3), pp. 283–304
- Morin E., 2005, *Introduction à la pensée complexe*, Points Seuil, Paris
- Morin J., Lavigne F., Bachèlery P., Finizola A., Villeneuve N., 2009, « Institutional and peoples response in the face of volcanic hazards in island environment : Case of Karthala volcano, Comoros Archipelago. Part I - Analysis of the May 2006 eruptive crisis », *SHIMA The International Journal of Research into Island Cultures*, vol. 3, Issue 1, pp. 33-53.
- Moussaid M. et Theraulaz G., 2011, « Comment les piétons marchent dans la foule », *La recherche*, numéro 450, Sophia, pp. 56-59
- Murray J. D., *Mathematical Biology I : An Introduction*, Springer, 1993
- Napoli A., 2004, « Formalisation des connaissances et contribution du langage de modélisation : application à l'aide à la modélisation du comportement des incendies de forêt », in : *Systèmes d'Information et Risques Naturels*, sous la direction Guarnieri F, et Garbolino, Mines ParisTech, Les Presses
- Navarro, O., Chavez, L., Piñeres, J. et Noreña, M., 2016, « Risk perception and coping strategies in population exposed and not exposed to flooding risk », *Interaméricain Journal of Psychology*, 50(3), pp. 331-346
- Navarro, O. et Fleury-Bahi, G., 2019, « Etude sur les comportements face aux risques imminents (tsunami) : expérimentation par simulation virtuelle et mesure physiologique du stress », *XV Congreso Internacional de Psicología Ambiental-PSICAMB*, Tenerife, 16-19 juillet 2019
- Noto R., Huguenard P., Larcen A., 1994, *Médecine de catastrophe*, Masson, Paris
- November V., 1994, « Risques naturels et croissance urbaine : réflexion théorique sur la nature et le rôle du risque dans l'espace urbain », *Revue de Géographie Alpine*, n°4, pp. 113-123
- November V., 2006, « Le risque comme objet géographique », *Cahiers de géographie du Québec*, vol. 50, n° 141, pp. 289–296
- November V., Penelas M. et Viot P., 2011, *Habiter les territoires à risques*, Lausanne, Presses polytechnique et universitaires romandes
- O'Brien K., Eriksen S., Nygaard L.P. & Schjolden A., 2007, « Why different interpretations of vulnerability matter in climate change discourses », *Climate Policy*, 7:1, pp. 73-88

Observatoire français de la sécurité des établissements scolaires et d'enseignement supérieur, 2002, Rapport annuel, <https://www.education.gouv.fr/ons/cid85820/les-publications-de-l-ons.html>

Olender M., 1982, Compte rendu de l'ouvrage de P. Borgeaud : « Recherches sur le Dieu Pan », *Le Nouvel Observateur*, 25 septembre.

d'Onorio J.B., 2014, *Monaco, monarchie et démocratie*, Presses universitaires d'Aix-Marseille

Orléan A., 1987, Anticipations et conventions en situation d'incertitude, *Cahier d'économie Politique*, n°13, pp. 153-172

Ouallet A., 2009, « Vulnérabilités et patrimonialisations dans les villes africaines : de la préservation à la marginalisation », *Cybergeog*, revue européenne de géographie

Overpeck J. et Weiss J.L., 2009, « Projections of future sea level becoming more dire », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(51), pp. 21461-21462.

Parrochia D., 2008, *La forme des crises – Logique et épistémologie*, Editions Champ Vallon, Seyssel

Paton D., 2018, *Développement de l'interface web d'un géoportail*, rapport de stage, Université du Havre, LITIS, encadrant : R. Charrier

Pelling M., 2003, *The vulnerability of cities*, James & James/Earthscan, London

Phan D. and Amblard F. (eds), 2007, *Agent-Based Modelling and Simulation in the Social and Human Sciences*, Bardwell Press, Oxford

Pigeon P., 1995, « Les risques dits naturels en montagne et leur gestion cartographique : l'exemple de Passy (Haute-Savoie) », *Festival de Saint-Dié consacré aux risques dits naturels*, St Dié des Vosges

Pigeon P., 1996, « La gestion des risques urbains », in : Bailly A., *Risques naturels, risques de société*, Economica, Paris, pp. 51-62

Pigeon P., 2005, *Géographie critique des risques*, Economica, Paris

Pigeon P., 2012, « Apports de la résilience à la géographie des risques : l'exemple de La Faute-sur-Mer (Vendée, France) », *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* vol. 12, n°1

Pigeon P. et Rebotier J., 2016, *Disaster Prevention Policies. A Challenging and Critical Outlook*, London, ISTE Press – Elsevier

Pigeon P., Rebotier J. et Guézo B., 2018, « Ce que peut apporter la résilience à la prévention des désastres : Exemples en Lavours et en Chautagne (Ain, Savoie) », *Annales de géographie*, n°719, 1, pp. 5-28

- Pigeon P., Rebotier J., et Metzger P., 2019, « Returning social context to seismic risk knowledge and management : lessons learned from an interdisciplinary research in the city of Esmeraldas, Ecuador », *Cybergeo : European Journal of Geography*, n° 389
- Pimm S.L., 1984, « The complexity and stability of ecosystems », *Nature*, 307(5949), pp. 321-326
- Priolo D., 2005, *Pour qu'un message préventif soit efficace, est-il possible d'agir sur les pensées en faisant appel à la peur ou bien de faire agir tout simplement ?*, Thèse de doctorat en Psychologie, Université Nice-Sophia Antipolis
- Propeck-Zimmermann E., Saint-Gérand Th., Haniotou H., Liziard S. et Medjkane M., 2018, « Ergonomie spatiale pour territoires résilients : approches et perspectives », *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, Hors-série 30
- Provitolo D., 2002, *Risque urbain, catastrophes et villes méditerranéennes*, Thèse de doctorat en géographie, Université de Nice-Sophia Antipolis
- Provitolo D., 2005, « Un exemple d'effets de dominos : la panique dans les catastrophes urbaines », *Cybergeo : European Journal of Geography*, n°328
- Provitolo D. et Daudé E., 2008, « System dynamics versus cellular automata in modelling panic situations », Actes du colloque *The European Simulation and Modelling Conference – ESM-*, Oct 27-29, 2008, Univ. du Havre, pp. 535–540
- Provitolo D., 2009, « A new classification of catastrophes based on Complexity Criteria », *From System Complexity to Emergent properties*, M.A. Aziz Alaoui and C. Bertelle (Eds), Series Understanding complex systems, Springer-Verlag, pp. 179-194
- Provitolo D., 2009, « Vulnérabilité et résilience, géométrie variable de deux concepts », *Séminaires de recherche sur la Résilience Urbaine, Ecole Normale Supérieure*, Nov. 2009, Paris-ULM
- Provitolo D. et Dubos-Paillard E., 2011, « Analyser les catastrophes : une approche par les comportements humains », *Réunion internationale Scigrad'11, 26 et 27 octobre 2011*, Paris
- Provitolo D., Frankhauser P., Morer M., Enaux Ch., Ansel D., Agbossou I., Peeters D., Caruso G., 2012, « Modèles de comportements collectifs et coopératifs », in : P. Frankhauser et D. Ansel (eds), *La décision d'habiter ici ou ailleurs*, Economica, Anthropos, Paris
- Provitolo D., 2012, « The Contribution of Science and Technology to meeting the Challenge of Risk and Disaster Reduction in Developing Countries : From Concrete Examples to the Proposal of a Conceptual Model of « Resiliency Vulnerability », in : J.-C. Bolay et al. (eds), *Technologies and Innovations for Development*, Springer-Verlag.
- Provitolo D., 2013, « Resiliency vulnerability notion - Looking in another direction in order to study risks and disasters », in : *Resilience and urban risk management*, Serre D., Barroca B., Laganier R. (Eds.), CRC Press, Taylor and Francis Group

- Provitolo D., Dubos-Paillard E. et Müller J.-P., 2014, « Une ontologie conceptuelle du domaine des risques et catastrophes », in : D. Phan (eds), *Introduction aux ontologies pour la modélisation multi-agents en sciences humaines et sociales*, Hermes
- Provitolo D., Dubos-Paillard E., Verdière N., Lanza V., Charrier R., Bertelle C., M. A. Aziz-Alaoui, 2015, « Les comportements humains en situation de catastrophe : de l'observation à la modélisation conceptuelle et mathématique », *Cybergeo : European Journal of Geography*, n°735
- Provitolo D. et Reghezza M., 2015, « Resilience and vulnerability : from opposition towards a continuum », in : *Resilience Imperative – Uncertainty, Risks and Disasters*, Eds Reghezza-Zitt et Rufat, Iste Press
- Provitolo D., 2016, *Les comportements humains, individuels et collectifs, en situation de catastrophe*, Rapport scientifique pour le SISA
- Provitolo D., Serre D., et Boschetti L., 2017, « Toward a process of resilience implementation : capacities, models and strategies », in : *Floods - Vol 1- Risk knowledge*, Eds F. Vinet, Elsevier.
- Provitolo D., Castagnola F., Huet V., Dreyfus R., 2018, *Elaboration d'un protocole de communication visant à développer la culture du risque d'inondation auprès de la population*, Rapport SISA-SMIAGE,
- Provitolo D. et Lozi R., 2018, « From observation to mathematical modeling of human behaviour in the face of disasters : an example of transdisciplinary research », *International Symposium on Computational Science and its Applications*, Feb 5-6, 2018, Sharda University, Greater Noida, India
- Provitolo D., Lozi R., Tric E., 2020a, à paraître, « Topological analysis of a weighted human behaviour model coupled on a streets and places network in the context of urban terrorist attack », in : *Recent Advances in Mathematical Models - optimization, industrial problems with analytic and numerical solutions*, Eds. Springer, Industrial and Applied Mathematics series
- Provitolo D., Lozi R., et Tric E., 2020b, à paraître, « A model to assess the role of spatial urban configurations on crowd evacuation dynamics during terrorist attacks », CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Przyluski V. et Hallegatte S., coord. 2012, *Gestion des risques naturels - Leçons de la tempête Xynthia*, Eds Quae, Versailles.
- Pumain D., Saint-Julien Th., Sanders L., 1989, *Villes et auto-organisation*, Economica : Paris
- Quarantelli E.L., 1954, « The Nature and Conditions of Panic », *The American Journal of Sociology*, vol. 60, Issue 3, pp. 267-275.
- Quarantelli E.L., 2008, « Conventional beliefs and counterintuitive realities », *Social research*, vol 75, n°3
- Quenault B., Pigeon P., Bertrand F., Blond N., 2011, « Vulnérabilité et résilience aux changements climatiques en milieu urbain : vers de nouvelles stratégies de développement

urbain durable ? » *Colloque du PIRVE et Rapport Programme PIRVE (Programme Interdisciplinaire de Recherche Ville et Environnement)*

Quenault B., 2013, « Retour critique sur la mobilisation du concept de résilience en lien avec l'adaptation des systèmes urbains au changement climatique », *EchoGéo*, n°24

Quenault B., 2014, « La résurgence/convergence du triptyque catastrophe-résilience-adaptation pour (re)penser la « fabrique urbaine » face aux risques climatiques », *Développement Durable et Territoires (DDT)*, vol. 5, n°3

Quenault B., 2015, « De Hyōgo à Sendai, la résilience comme impératif d'adaptation aux risques de catastrophe : nouvelle valeur universelle ou gouvernement par la catastrophe ? », *Développement durable et territoires*, vol.6, n°3

Rapport Cour des Comptes, 2012, *Les enseignements des inondations de 2010 sur le littoral atlantique (Xynthia) et dans le Var*

Reghezza M., 2006, *Réflexions sur la vulnérabilité métropolitaine. La métropole parisienne face au risque de crue centennale*, thèse de l'Université de Nanterre - Paris X.

Reghezza M., 2009, « Géographes et gestionnaires au défi de la vulnérabilité métropolitaine. Quelques réflexions autour du cas francilien », *Annales de géographie*, n°669, pp. 459-477.

Reghezza M., 2012, *Paris coule-t-il ?*, Fayard, Paris

Reghezza M., 2015, *De l'avènement du Monde à celui de la planète : le basculement de la société du risque à la société de l'incertitude*, Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Géographie, Université Paris 1- Panthéon Sorbonne

Reghezza M. et Rufat S., eds, 2015, *Resilience Imperative – Uncertainty, Risks and Disasters*, Eds Iste Press

Regnier A., 1968, « Mathématiser les sciences de l'homme », *Revue française de sociologie*, vol. 9, pp. 307-319

Revet, S., 2009, « De la vulnérabilité aux vulnérables. Approche critique d'une notion performative », in : Becerra S., Peltier A. (eds), *Risques et environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés*, L'Harmattan, Paris

Resilience Alliance, <http://www.resalliance.org/1.php>

Richemond A., 2003, *La Résilience économique, Une chance de recommencement...*, Edition d'Organisation : Paris.

Robert B. et Hémon Y., 2012, « Organizational resilience : a multidisciplinary sociotechnical challenge », in : Serre D., Barroca B. et R. Laganier R., *Resilience and Urban Risk Management*, CRC Press Balkema, Taylor & Francis Group

Romeo F., 2019, *Tsunami en zone méditerranéenne – Vulnérabilité et résilience de la Côte d'Azur et de ses infrastructures critiques*, Mémoire de recherche pour l'obtention du diplôme de spécialisation en Architecture et Risques majeurs, Ecole nationale supérieure

d'architecture de Paris Belleville, Stage et mémoire au CRC Mines ParisTech et UMR Géoazur

de Rosnay J., 1975, *Le macroscopie*, Paris, Ed. du Seuil, Paris

de Rosnay J., 1995, *L'homme symbiotique : regards sur le troisième millénaire*, Ed. du Seuil, Paris

Rossignol J.Y., 2018, *Complexité : Fondamentaux à l'usage des étudiants et des professionnels*, EDP Sciences, France

Roudil P., Schindelé F., Bossu R., Alabrune N., Arnoult P., Duperray P., Gailler A., Guilbert J., Hébert H. and A. Loevenbruck, 2013, « The French tsunami warning center for the Mediterranean and Northeast Atlantic : CENALT », *Science of Tsunami Hazard*, 32, 1, 1-7.

Ruin I., Lutoff C., Boudevillain B., Creutin J.-D., Anquetin S., Bertran Rojo M., Boissier L., Bonnifait L., Borga M., Colbeau-Justin L., Creton-Cazanave L., Delrieu G., Douvinet J., Gaume E., Grunfest E., Naulin J.-P., Payrastre O., Vannier O., 2014, « Social and Hydrological Responses to Extreme Precipitations : An Interdisciplinary Strategy for Postflood Investigation », *Weather, Climate and Society*, 6(1), pp. 135-153

Rutter M., 2003, Genetic Influences on risk and protection : Implications for understanding resilience, in : S. S. Luthar (Ed.), *Resilience and vulnerability : Adaptation in the context of childhood adversities*, pp. 489-509, Cambridge University : Press New York

Sahal L A., 2011, *Le risque tsunami en France : contribution méthodologique pour une évaluation intégrée par scénarios de risque*, Thèse de doctorat, Laboratoire de Géographie physique, Université Panthéon-Sorbonne, sous la direction de F. Lavigne et F. Leone, Paris

Salini P., 2016, *Introduction à la dynamique des systèmes*, Economie systémique, Editions universitaires européennes, Verlag, Saarbrücken

Sanchez A., 2010, « Analyse de l'aléa « chute de blocs » et de la vulnérabilité territoriale du sous-système littoral des Alpes-Maritimes », Mémoire de Master 2, Co-encadrement D. Provitolo, Th. Lebourg, UMR Géoazur

Sanders L., 2013, « Trois décennies de modélisation des systèmes de villes : sources d'inspiration, concepts, formalisations », *Revue d'Économie Régionale et Urbaine*, décembre(5), pp. 833-856

Sander D., 2011, « Le pouvoir des émotions », *L'essentiel Cerveau et Psycho : Les émotions au pouvoir*, N° 7, août-octobre 2011, pp. 4-7

Selma T., 2015, « Prévenir les mouvements de panique dans la foule », *Préventique, Risque chimique, un nouvel enjeu sociétal*, n° 141

Sénat, 2019, Rapport *La prévention et l'alerte du risque de tsunami sur les côtes françaises*, 21 mars 2019, n° 399

Serre D., Barroca B. et R. Laganier R., 2012, *Resilience and Urban Risk Management*, CRC Press Balkema, Taylor & Francis Group

- Serre D., 2014, « Approcher la résilience urbaine par la technique. Construction d'un socle scientifique préalable à la résilience intégrée », pp. 245-261, in : *Fragilités et résilience – Les nouvelles frontières de la mondialisation*, sous la direction de J.M. Châtaigner, Edition Karthala, Paris
- Serre D., 2017, Présentation du modèle DS3 issue de D. Provitolo, D. Serre, L. Boschetti « Toward a process of resilience implementation : capacities, models and strategies », in : *Floods : Vol 1- Risk knowledge*, Eds F. Vinet, Elsevier.
- Schoon I., 2006, *Risk and Resilience. Adaptations in Changing Times*, Chapter 1. Cambridge University Press
- Skinner B.F., 1957, *Verbal behavior*, Appleton-Century-Crofts : New York
- Sillamy N., 1993, *Dictionnaire usuel de psychologie*, Bordas, Paris
- Sornette D., 2006, *Critical Phenomena in Natural Sciences : chaos, fractals, selforganization and disorders*, Berlin, Springer Verlag, 2^{ème} edition
- Soussignan R., 2011, « Un monde d'émotions », *L'essentiel Cerveau et Psycho : Les émotions au pouvoir*, n° 7, août-octobre 2011
- Steiner P., 2005, « Introduction cognitivisme et sciences cognitives », *Labyrinthe*, n°20, pp 13-39
- Steward I., 1998, *La nature et les nombres*, Hachette, Paris
- Tarde G., 1890, *Les lois de l'imitation*, Félix Alcan, Paris; Editions Kimé, Paris, 1993.
- Terrier M., Sedan O., Marçot N., 2010 - *Projet RATCOM : Méthode d'évaluation de la vulnérabilité aux tsunamis en Méditerranée occidentale*, Rapport BRGM/RT - 58595-FR.
- Thiétart R-A. et Xuereb J.M., 2015, *Des concepts à leur mise en œuvre*, 3^{ème} éditions, Dunod, Paris
- Tisseron S., 2007, *La résilience*, Presses Universitaires de France, « Que sais-je ? », Paris
- Tisseron S., 2017, Les quatre vagues de la résilience, in : Landau B. et Diab Y., *Résilience, vulnérabilité des territoires et génie urbain*, Les Presses des Ponts, Paris
- Toubin, M., Serre D., Diab Y. et Laganier R., 2011, « Improve urban resilience by a shared diagnostic integrating technical evaluation and governance », *European Geoscience Union (EGU)*, Vienna, Austria
- Thouret J.C. et D'Ercole R., 1996, « Vulnérabilité aux risques naturels en milieu urbain : effets, facteurs et réponses sociales », *Cab. Sci. hum.* 32 (2), pp. 407-422
- Tricot A., 2016, « Le recueil des données subjectives en géographie, expérimentation d'une démarche nommée *Enquête Gulliver* à la croisée de la cartographie participative et des cartes mentales. Intérêts, limites et perspectives », *Rencontres du réseau MATE SHS, Produire et collecter des données*, 15-18 novembre 2016, Fréjus

- Tricot A., 2017, « Expérimentation d'une démarche méthodologique explorant les ressorts du sensible dans l'analyse de la perception des changements de l'environnement : présentation de l'enquête Gulliver », *6ème Congrès International EUGEO*, 4-6 septembre 2017, Palace of Academy, Bruxelles
- Turner B.L., Kasperson R. E., Matson P. A., McCarthy J. J., Corell R. W., Christensen L., Eckley N., Kasperson J. X., Luers A., Martello M. L., Polsky C., Pulsipher A. et Schiller A., 2003, « A Framework for Vulnerability Analysis in Sustainability Science », *Proceedings from the National Academy of Science*, vol. 100, n° 14, pp. 8074-8079
- Tyhurst J.S., 1957, « Psychological and social aspects of civilian disaster », *Can. Med. Assoc.*, 76(5), pp. 385-303
- UNISDR, 2004, *Living with risk : a global review of disaster reduction initiatives*, Reference code DRR7732, United Nations Office for Disaster Risk Reduction
- UNISDR, 2015, *Global assessment report on disaster risk reduction*, United Nations Office for Disaster Risk Reduction
- Vale L. J. et Campanella T. J., 2005, *The Resilient City. How Modern Cities Recover from Disaster*, Oxford University Press, New York
- Van der Leeuw S.E. et Aschan-Leygonie Ch., S., 2001, « A long-term perspective on resilience in social-natural systems », *Working papers of the Santa Fe Institute*, n°01-08-042
- Varela, F. 1998, « Le cerveau n'est pas un ordinateur », *La Recherche*, n° 308, pp. 109-112
- Varenne F. et Silberstein M., 2013, *Modéliser et simuler. Epistémologie et pratiques de la modélisation et de la simulation*, Tome 1, Vol. 2., Editions Matériologiques, Paris
- Vermeiren E., 2007, « Psychologie des foules : éléments de compréhension et de prévention en situation de catastrophe collective », pp. 777-783, *Urgence 2007*, Samu de France
- Verdière N., Cantin G., Provitolo D., Lanza V., Dubos-Paillard E., Charrier R., M. A. Aziz-Alaoui, Bertelle C., 2015, « Understanding and simulation of human behaviors in areas affected by disasters : from the observation to the conception of a mathematical model », *Global Journal of Human-Social Sciences*, vol 15, Issue 10
- Verhulst E., Richard P., Provitolo D. et Navarro O., 2019, « Virtual Tsunami : navigation technique and user behavior analysis during emergency, *1st International Conference for Multi-Area Simulation – ICMASim*, Angers, 8-10 octobre 2019.
- Villagran de Léon J. C., 2006, « Vulnerability : A methodological and conceptual review », *Source*, n°4, UNU-EHS
- Villa S., Goatin P. et Chalons C., 2017, « Moving bottlenecks for the Aw-Rasclé-Zhang traffic flow model », *Discrete Contin. Dyn. Syst. Ser. B*, 22(10), pp. 3921-3952
- Villar C. et Guézo B., 2017, *La résilience des territoires aux catastrophes*, Eds Commissariat général au développement durable – Direction de la recherche et de l'innovation, Paris

- Vinet F., (eds.), 2017a, *Flood 1 – Risk knowledge et Flood 2 – Risk management*, ISTE Press, Elsevier Editions
- Vinet F., Boissier L. et Defossez S., 2011, « La mortalité comme expression de la vulnérabilité humaine face aux catastrophes naturelles : deux inondations récentes en France (Xynthia, var, 2010) », *Revue Vertigo*, vol 11, n°2
- Vinet F., 2003, *Crues et inondations dans la France méditerranéenne. Les crues torrentielles des 12 et 13 novembre 1999*, Editions du temps, Nantes
- Vis M., Klijn F. et Van Buuren M. (éd.) (2001), *Living with floods. Resilience strategies for flood risk management and multiple land use in the lower Rhine River basin*, Delft, NCR-publication 10-2001, NCR
- Von Bertalanffy, L., 1973, *Théorie générale des systèmes*, Dunod, Paris
- Walker B., Holling C. S., Carpenter S. R., and Kinzig A., 2004, « Resilience, Adaptability and Transformability in Social-ecological systems », *Ecology and Society*, 9(2)
- Walker B. H., Anderies J. M., Kinzig A. P., and Ryan P., 2006, « Exploring resilience in social-ecological systems through comparative studies and theory development : introduction to the special issue », *Ecology and Society*, 11(1)
- Walliser, 1977, *Systèmes et modèles : introduction critique à l'analyse de systèmes*, Editions du Seuil : Paris
- Weinberg A., 2014, « Les formes du raisonnement », in : *Le cerveau et la pensée – Le nouvel âge des sciences cognitives*, Eds. J.F. Dortier, Sciences Humaines Editions, Auxerre
- Wildavsky A., 1988, « Searching for Safety », *The Social Philosophy and Policy Center*, Transaction Books, New Brunswick
- Wisner B., O'Keefe P., Westgate K., 1976, « Taking the Naturalness out of Natural Disaster », *Nature*, vol. 260, n°5552, pp. 566-567
- Wisner B., 1998, « Marginality and vulnerability : why the homeless of Tokyo don't count in disaster preparations », *Applied Geography*, 18 (1), pp. 25-33
- Wisner B., Blaikie P., Cannon T., et Davis I., 2004, *At Risk : Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters*, Routledge : New York
- White G.F., 1974, *Natural hazards : local, national, global*, Oxford University Press, Toronto
- Whyte A., 1978, *La perception de l'environnement : lignes directrices méthodologiques pour les études sur le terrain*, Notes techniques du MAB, Vol. 5, Unesco, Paris
- Wright M. O. et Masten A. S., 2005, « Resilience Processes in Development : Fostering Positive Adaptation in the Context of Adversity », in : S. Goldstein & R. B. Brooks (Eds.), *Handbook of resilience in children*, pp. 17-37, US : Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York

Zhao J., Aziz-Alaoui M. A., et Bertelle C., 2012, « Cluster synchronization analysis of complex dynamical networks by input-to-state stability », *Nonlinear Dynamics*, 70(2), pp. 1107-1115

Zwirn H., 2006, *Les systèmes complexes – Mathématiques et biologie*, Odile Jacob, Paris