



HAL
open science

Approche multi-risques en milieu urbain. Le cas des risques sismique et technologiques dans l'agglomération de Mulhouse (Haut-Rhin)

Elise Beck

► **To cite this version:**

Elise Beck. Approche multi-risques en milieu urbain. Le cas des risques sismique et technologiques dans l'agglomération de Mulhouse (Haut-Rhin). Géographie. Université Louis Pasteur Strasbourg I, 2006. Français. NNT: . tel-03615812

HAL Id: tel-03615812

<https://hal.science/tel-03615812>

Submitted on 21 Mar 2022

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.

- Thèse présentée pour obtenir le grade de
- Docteur de l'Université Louis Pasteur
- Strasbourg I
-
- Disciplines : Géographie et Sciences de la
- Terre et de l'Univers
- par **Elise Beck** ■

Approche multi-risques en milieu urbain. Le cas des risques sismique et technologiques dans l'agglomération de Mulhouse (Haut-Rhin)

Soutenue publiquement le 26 septembre 2006 ■

Membres du jury ■

- Co-directrice de Thèse : Mme Christiane Weber, Directeur de recherche CNRS,**
Laboratoire Image et Ville, Université Louis Pasteur, Strasbourg I
- Co-directeur de Thèse : M. Michel Granet, Physicien du Globe,**
Institut de Physique du Globe de Strasbourg, Université Louis Pasteur, Strasbourg I
- Rapporteur Interne : Mme Anne-Véronique Auzet, Professeur,**
Institut de Mécanique des Fluides et des Solides, Université Louis Pasteur, Strasbourg I
- Rapporteur Externe : M. André Dauphiné, Professeur,**
Étude des Structures, des Processus d'Adaptation et des Changements des Espaces,
Université de Nice-Sophia Antipolis
- Rapporteur Externe : M. Olivier Maquaire, Professeur,**
Laboratoire Géophen, Université de Caen Basse-Normandie
- Examineur : M. Thierry Winter, Docteur,**
Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans

Remerciements

Rédiger la page des remerciements, c'est faire le tour de tous celles et ceux sans qui ce travail n'aurait pu être achevé. C'est se retourner, regarder derrière soi, quatre ans en arrière, et tâcher de recenser sans trop en oublier toutes les personnes dont la participation, le soutien ou le conseil ont compté.

Je souhaite tout d'abord adresser mes sincères remerciements à Christiane Weber, directrice de recherches au Laboratoire Image et Ville, et Michel Granet, physicien du globe à l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg, pour avoir co-dirigé cette thèse, pour s'être lancés avec moi dans cette aventure, celle d'une thèse pluridisciplinaire en géographie et géophysique. Je les remercie vivement pour les échanges riches que nous avons pu avoir, pour leur soutien et leur confiance.

Mes remerciements vont également à Anne-Véronique Auzet, professeur, André Dauphiné, professeur, Olivier Maquaire, professeur, et Thierry Winter, docteur, pour avoir consenti à faire partie du jury de cette thèse.

Je garde un très bon souvenir des heures de labeur passées avec certaines personnes qu'il me faut remercier : Thibaud Piquet, anciennement ingénieur d'études au RéNaSS, pour m'avoir initiée aux joies des campagnes de mesures sismiques et au traitement des signaux ; Benoît Le Brun, anciennement ingénieur au BRGM, pour m'avoir appris à déceler les mystères des rapports H/V ; Colette Cauvin, professeur à la retraite, pour sa rigueur, ses conseils avisés méthodologiques et bibliographiques et, surtout, pour m'avoir poussée à me lancer dans l'aventure d'une thèse de doctorat ; enfin, Sandrine Glatron, chargée de recherches au CNRS, pour tous nos échanges fructueux, professionnels et plus informels.

Leurs précieux contacts m'ont permis de mener à bien ce travail : merci à M.-P. Pawlas (Ville de Mulhouse), J.-P. Reduron (CAMSA), E. Chéron (Rhodia), C. Floderer (DRIRE Alsace), Agathe Roullé (BRGM) et Claudia Pohl (LGRB). Que soient également remerciés ici les particuliers qui ont accepté d'accueillir une station sismique durant la campagne de mesures de l'été 2004, tout comme les vacataires qui ont participé aux missions de terrain dans des conditions climatiques parfois difficiles.

L'ensemble des membres du RéNaSS sont également vivement remerciés, Marc Grunberg, ingénieur, Christiane Nicoli, technicienne, Christophe De Peretti, technicien, Alain Hernandez, anciennement emploi-jeune. Je remercie également les membres du Laboratoire Image et Ville et plus particulièrement Anne-Christine Bronner, ingénieur d'études, pour ses conseils en cartographie et ses relectures des figures, Estelle Baehrel, technicienne, secrétaire scientifique, Yasmina Ramrani et Jacky Hirsch, ingénieurs de recherche, Rosine Schlumberger, adjointe technique en soutien à la recherche, et Nadège Blond, chargée de recherche.

Cette thèse n'aurait pas été la même sans mes compagnons d'aventure, Annett, Stéphane, Kaira, Azadeh, Dong Binh, mes colocataires du bureau 417, Olivier, Alex, Stéphanie, Valérie... , doctorants ou jeunes docteurs du Laboratoire Image et Ville et de l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg, ainsi que Julien et Nicolas, ex-moniteurs au CIES Alsace.

Leurs encouragements ont compté plus qu'ils ne s'en sont doutés : un grand merci à Emilie, pour son amitié et tout ce que nous avons partagé depuis la licence et plus spécialement

depuis le DEA, à Christelle, Claire, Thomas, Hélène, Adrien, Judith, Cécile... et tous les autres qui, de près ou de loin, m'ont apport e leur soutien sans conteste. Enfin, merci à ma famille, proche ou étendue (Marie-José, Thomas, Benoît, Claire, Sonia, Alain, Marjo, Gabriel...), plus spécialement à mon père Jean-Pierre, pour ses relectures attentives, et, surtout, Yves, pour son amour, sa confiance, sa patience, son soutien inestimable et sa compréhension, plus particulièrement dans la dernière ligne droite. Enfin, toutes celles et tous ceux que je n'ai pas cit es mais qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à l'achèvement de ce travail.

Introduction générale

De tous temps, des catastrophes naturelles et technologiques se sont produites et ont causé de nombreux dommages et victimes. De l'incendie de Londres (1666) à celui du Bazar de la Charité (1897), de l'éruption du Vésuve (79) à celle de la Montagne Pelée (1902), de l'accident de Bhopal (1984) à celui d'AZF (2001), les catastrophes ont depuis toujours marqué les esprits, certaines plus particulièrement, parce qu'elles avaient causé beaucoup de dommages parce qu'elles avaient fait de nombreuses victimes, parce qu'elles avaient été mal gérées, parce qu'on ne s'y attendait pas. . . Nombreuses sont les catastrophes à la suite desquelles on entend des "on n'avait jamais vu ça". Est-ce réellement le cas ? L'inventaire des accidents technologiques et des événements catastrophiques naturels qui se sont produits au cours de l'histoire nous montre bien une certaine répétitivité, surtout en ce qui concerne les phénomènes naturels. La mémoire de l'homme lui ferait-elle défaut ? Les habitants (et les autorités) de Banda Aceh avaient-ils "oublié" qu'en 1992 un tsunami avait causé la mort de 2 000 personnes lorsque la vague meurtrière avait frappé les côtes indonésiennes ? Pourtant, ceux de l'île de Simeulue se sont rappelé le raz-de-marée de 1907, qui avait fait plusieurs milliers de victimes.

La mémoire des catastrophes constitue un des moteurs de l'acculturation aux risques. Les sociétés qui entretiennent le souvenir des événements passés s'avèrent plus sensibilisées, plus réceptives peut-être aux campagnes de prévention et, surtout, préparées à l'occurrence d'une future catastrophe. Elles développent une réelle culture des risques. Alors que ces sociétés se font rares, celles qui ont tendance à oublier ou ne pas véhiculer la mémoire des catastrophes développent des pratiques les exposant davantage aux phénomènes dangereux : construire dans le champ d'expansion d'un cours d'eau, sur les pentes d'un volcan. . . , autant de pratiques qui illustrent que les préoccupations du quotidien l'emportent largement sur des événements catastrophiques plus ou moins rares et plus ou moins probables.

A cette absence de mémoire des catastrophes s'oppose une demande sociétale, justifiée par un besoin de plus en plus fort de maîtriser son environnement. La société interpelle directement le scientifique et les autorités pour qu'ils apportent des éléments de réponses à la compréhension des phénomènes, à l'identification des causes, des défaillances et, dans le contexte assurantiel des pays développés, à la désignation des responsables : une fois la catastrophe passée, on veut comprendre pourquoi les dommages et les victimes ont été si nombreux, pourquoi la crise a été mal gérée, pourquoi "on ne s'y attendait pas". Il est vrai que les grandes catastrophes marquent les esprits : cependant, cette sensibilisation décroît au fur et à mesure que le temps s'écoule et que la catastrophe appartient au passé. "Dans un tel contexte, la société est ballottée, et passe alternativement d'un oubli confirmé (quand la dernière inondation est loin), à une fixation subjective (sur l'inondation qui vient de se produire) guère plus efficace, avec en permanence une tendance forte à ignorer ou

contourner les règles contraignantes [imposées par la réglementation]” [November, 2000, *in* Gleyze, 2002].

L’absence de culture et de mémoire des risques rend nécessaires les campagnes de prévention par la diffusion d’une information précise et conforme à la situation réelle. En amont de cette phase de diffusion de l’information, la connaissance et l’évaluation des risques constitue une étape essentielle à une meilleure prise en compte des phénomènes destructeurs.

L’amélioration de la connaissance d’un phénomène quelconque nécessite de considérer l’ensemble de ses composantes, de ses manifestations et de ses interactions avec les autres phénomènes ou, vu sous l’angle de la systémique, avec les autres systèmes. Pourtant, si l’on considère la problématique des risques, beaucoup d’études portent sur leur évaluation, sur l’estimation des conséquences d’une catastrophe donnée, mais peu d’entre elles considèrent les interactions entre risques. Cependant, les exemples de réactions en chaîne observées au cours de catastrophes ne manquent pas (incendies suite au séisme de San Francisco en 1906, inondations consécutives à la tempête de fin 1999, etc.). Ceci est d’autant plus vrai en milieu urbain, car les villes constituent des systèmes complexes dynamiques dont les différentes composantes naturelles (eau, air, sol), sociales (population, activités - et parmi elles les activités dangereuses. . .) et technologiques (bâtiments, infrastructures, industries, services. . .) interagissent entre elles.

Dans l’objectif d’améliorer nos connaissances sur les risques et en considérant l’ensemble de leurs composantes (aléa et vulnérabilité), nous nous sommes interrogée sur les interactions qui pouvaient exister entre risques de nature différente. Il en découle quelques questions : comment analyser et représenter des effets dominos ? Quelles sont les relations entre un système naturel et un système social ? Est-ce que, dans un contexte donné, des interactions entre risques peuvent être observées ? Si c’est le cas, comment se traduisent-elles en termes de conséquences sur un système urbain ? Comment en tenir compte dans la prévention des risques ? Dans la simulation d’une catastrophe ? Comment formaliser ces interactions dans un système d’information géographique ?

Nous avons souhaité élaborer une méthodologie d’identification et de caractérisation des interactions entre deux risques de nature différente, le risque sismique et les risques technologiques, tout en considérant leurs différentes composantes (aléa et vulnérabilité).

L’étude a été appliquée à la région de Mulhouse (Haut-Rhin), exposée à sept aléas de nature différente et constituant une ville “vulnérable” en raison de sa population importante et de sa position à proximité d’un bassin économique tri-national (France, Allemagne, Suisse).

Un premier chapitre présente le contexte général de l’étude et les concepts associés, afin de pointer la nécessité de s’engager vers des études multi-risques intégrées, c’est-à-dire prenant en compte l’aléa et la vulnérabilité et portant sur différents risques et leurs interactions. Nous formulons l’hypothèse selon laquelle des interactions entre risque sismique et risques technologiques peuvent être observées dans la région étudiée.

Dans un deuxième chapitre, nous décrivons l’intégralité de la chaîne d’étude des interactions entre risques sismique et technologiques en milieu urbain : de l’évaluation des aléas à la caractérisation de la vulnérabilité des bâtiments et de la population, et de l’analyse des risques à l’identification de leurs interactions par l’intermédiaire de la simulation de l’occurrence d’un événement sismique. L’objectif principal de cette thèse est avant tout d’étudier les interactions entre risques. Deux sous-objectifs sont identifiés : d’une part,

améliorer nos connaissances sur les risques dans l'agglomération mulhousienne et, d'autre part, élaborer un outil d'aide à la décision sous la forme d'un SIG multi-risques, à destination des autorités mulhousiennes en charge de la gestion des risques. En effet, le but est de proposer une méthodologie transférable et d'apporter une connaissance applicable et utilisable, pouvant être intégrée dans des documents d'aménagement et utilisée dans la mise en place d'une cellule de crise.

Un troisième chapitre présente la zone d'étude en tant qu'"agglomération multi-risques" ainsi que les résultats de l'application à la région mulhousienne de la méthodologie développée dans le deuxième chapitre. Une réflexion sur la prise en compte des interactions dans la gestion des risques par les autorités locales est également menée.

Enfin, la conclusion synthétise les résultats de ce travail et suggère quelques perspectives de recherche, dans l'objectif d'affiner les résultats obtenus et de poursuivre la réflexion sur les interactions entre risques.

Chapitre 1

Étude multi-risques en milieu urbain : contexte, concepts, objectifs

Toute étude, quelle qu'elle soit, mais notamment pluridisciplinaire, nécessite avant tout de définir certains concepts et notions. Ceci est d'autant plus vrai dans notre travail, celui de l'étude de risques multiples car, on le verra, les définitions acceptées pour certains termes varient d'une discipline à une autre, tout comme elles ont évolué dans le temps. L'occasion est trouvée, dans ce premier chapitre, de mettre à plat le contexte dans lequel ce travail de doctorat s'inscrit et de poser les bases qui mèneront à la formulation de la problématique.

1.1 Le risque, objet d'étude pluridisciplinaire

1.1.1 Histoire du risque

Si la notion de risque naturel semble aujourd'hui adoptée et comprise de tous, elle a fait son entrée dans le vocabulaire français relativement tardivement, il y a tout juste un quart de siècle, puisqu'elle se substitue au terme de "calamité publique" en 1982 [Veyret, 2001]. Pourtant, le terme de "risque" est apparu bien plus tôt dans la langue française, dès 1663. On l'employait alors dans le domaine du commerce maritime, pour désigner ce à quoi les armateurs et négociants devaient faire face sur leurs longs et périlleux trajets en mer. Auparavant, le risque tel que nous l'entendons aujourd'hui était remplacé par le terme *danger*, apparu dans la langue française dès le XIV^e siècle.

Cette évolution de la terminologie du risque tel que nous le définissons aujourd'hui est liée à son appréhension et à sa perception par l'homme au cours de l'histoire. Comme le soulignent J.-L. Fabiani et J. Theys [Fabiani et Theys, 1987], l'histoire du risque se décompose en trois périodes : de l'Antiquité à 1755, du milieu du XVIII^e siècle au début du XX^e siècle et de 1900 à nos jours.

De l'Antiquité au milieu du XVIII^e siècle, les hommes disposent de peu de connaissances techniques pour expliquer les phénomènes catastrophiques. Ainsi, les nombreux fléaux naturels, les grands incendies et les épidémies qu'ils subissent sont interprétés comme des colères et des châtements divins, en réponse à des péchés commis par les hommes sur terre.

Face à ces calamités, l'attitude des hommes est passive et fataliste, puisque "la catastrophe est alors totalement séparée de sa cause" [Dauphiné, 2001].

Le tremblement de terre de Lisbonne en 1755 va révolutionner la perception des catastrophes : J.-J. Rousseau, écrivant à Voltaire, rompait avec l'idée que la nature, et par là-même la colère divine, était seule responsable de ces calamités : "Ce n'est qu'à Lisbonne que l'on s'émeut des tremblements de terre, alors que l'on ne peut douter qu'il ne s'en forme aussi dans les déserts. Convenez que la nature n'avait point rassemblé là vingt mille maisons de six à sept étages et que, si les habitants de cette grande ville eussent été dispersés plus également et plus légèrement logés, le dégât eut été beaucoup moindre et peut-être nul". Il sous-entendait par là que l'homme et la société étaient alors capables d'intervenir pour limiter les catastrophes : l'idée de prévention des risques naturels était née ¹. Le début de cette deuxième période coïncide également avec la fin des grandes épidémies de peste (la dernière épidémie a frappé Marseille en 1720) et la création de la première machine à vapeur en 1769, marquant ainsi le début de la Révolution Industrielle et l'apparition de nouveaux dangers suite au passage de l'artisanat à l'industrie [Hiegel, 2003]. Les populations devaient toujours faire face à des épidémies, des incendies et des catastrophes naturelles mais le changement de système de production n'a pas été sans conséquences sur les hommes et leurs biens : catastrophes minières, accidents dus à la manipulation d'explosifs, accidents de transport dus au développement des trains et à l'apparition du métro. Les dangers se sont diversifiés et, parallèlement, leur perception a changé : la recherche des causes des accidents ou la compréhension des phénomènes naturels ont fait naître une prise de conscience par la société et les hommes. Des mesures de prévention se sont alors développées, une réglementation s'est progressivement mise en place (décret impérial du 15 octobre 1810 relatif aux Manufactures et Ateliers qui répandent une odeur insalubre ou incommode ; ordonnance du 14 janvier 1815 contenant un règlement sur les manufactures, les établissements et les ateliers qui répandent une odeur insalubre ou incommode).

La troisième période de l'histoire du risque, de 1900 à nos jours, est marquée par une diversification des menaces d'origine anthropique, avec l'introduction de nouvelles énergies (pétrole, électricité, énergie nucléaire...), de nouvelles technologies (biotechnologies, procédés de chimie organique...) et le développement des modes de transport, notamment du transport collectif et de masse (voiture, aviation...). Pour y faire face et les éviter, les autorités nationales ou internationales mettent en place des mesures de prévention et multiplient les textes de loi réglementant les activités et l'aménagement urbain. La perception des risques a également évolué, puisque la société est de plus en plus en attente de réponses et d'explications lorsqu'une catastrophe se produit. C'est notamment le cas lorsqu'un accident technologique survient, car la multiplicité des normes de sûreté, dont l'objectif est de limiter son occurrence, le rend difficilement acceptable.

Ainsi, la perception du risque a évolué au cours de l'histoire, parallèlement à l'évolution des connaissances sur les phénomènes et au développement des technologies et de l'industrie.

¹Les mesures de prévention des incendies s'étaient déjà développées dès le XIII^e siècle [Chaline et Dubois-Maury, 1994].

1.1.2 Définitions

1.1.2.1 Des visions disciplinaires et complémentaires du risque

Le risque fait l'objet de nombreux travaux de recherche dans des disciplines variées : géographes, géophysiciens, écologues, sociologues, économistes... s'intéressent à cet objet d'étude pluridisciplinaire. Chaque discipline possède sa propre vision du risque ; certaines s'intéressent davantage aux processus, d'autres aux effets. Il en résulte une multitude de définitions qui enrichissent la notion de risque, puisque ces définitions apparaissent complémentaires².

Définitions générales

Dans le cadre de sa thèse, C. Hiegel a identifié les différentes définitions contemporaines du risque et les connotations que chacune d'entre elles véhiculait [Hiegel, 2003].

Tout d'abord, un risque est défini par le Petit Robert (édition 1996) comme un "danger éventuel plus ou moins prévisible" : il s'agit de la première définition. Le caractère aléatoire est bien signifié. Deux notions sont rattachées à cette première définition, le danger et sa probabilité ; elle rejoint ainsi la définition de C. Chaline et J. Dubois-Maury : "éventualité, probabilité de danger" [Chaline et Dubois-Maury, 1994].

La deuxième définition du Petit Robert est davantage appliquée au domaine juridique : "éventualité d'un événement ne dépendant pas exclusivement de la volonté des parties et pouvant causer la perte d'un objet ou tout autre dommage". Par extension, "événement contre la survenance duquel on s'assure". L'accent est mis sur le caractère destructeur de l'événement redouté et sur ses conséquences. C. Hiegel retient les notions de perte et de dommages et considère qu'il s'agit d'une vision négative du risque [Hiegel, 2003].

Enfin, la troisième définition généraliste du risque revient au Secrétariat d'État de l'Environnement et de la Prévention des Risques Technologiques et Naturels Majeurs, selon lequel "le risque résulte de la conjonction d'un aléa (c'est-à-dire d'un événement qui peut affecter un système donné) et des enjeux en présence (à savoir les personnes, biens, équipements, environnement) susceptibles de subir des dommages ou des préjudices" (1991, *in* Hiegel, 2003). Cette définition fait intervenir les notions d'aléas et d'enjeux, sur lesquelles nous reviendrons dans le paragraphe suivant.

Définition des économistes

Selon les économistes, le risque est la "possibilité de perte monétaire due à une incertitude que l'on peut quantifier". L'événement responsable de la perte n'est pas clairement défini (excepté qu'il s'agit d'une incertitude) ; l'accent est mis sur les conséquences de l'événement et sur l'aspect financier.

Définition des sismologues

Le risque sismique correspond à l'"espérance mathématique, c'est-à-dire le pourcentage probable, pendant un certain laps de temps et dans une région déterminée, des pertes en biens et activités productives ou en vies humaines" [Madariaga et Perrier, 1991, p. 183]. L'accent est mis sur les dommages subis. J. Lambert se rapproche des définitions

²La plupart des définitions sont regroupées dans un glossaire en annexe 2.

“classiques” du risque : “pertes économiques et en vies humaines pouvant résulter de l’aléa sismique. Le risque sismique est le produit de l’aléa par la vulnérabilité à cet aléa” [Lambert (dir.), 1997].

L'évolution des approches et des définitions des géographes

L’appréhension du risque par les communautés de géographes, tant françaises qu’anglo-saxonnes, a évolué au cours du temps. En effet, les géographes français, comme par exemple E. de Martonne [de Martonne, 1909] et J. Tricart [Tricart, 1958], se sont tout d’abord intéressés au risque à partir de l’**aléa**, en étudiant les phénomènes naturels, les processus, leurs mécanismes de déclenchement, leurs manifestations, leurs conséquences. L’homme, ses activités, ses biens, bien qu’exposés à ces phénomènes, ne faisaient pas l’objet d’études approfondies. A l’opposé, dans les années 1970 ³, l’École de Chicago avec G. White, I. Burton et R. Kates a étudié le risque sous un angle différent, en y intégrant une **dimension sociale** et en développant des études sur la perception des risques [Ducret, 1994].

Un réel changement de paradigme s’est opéré, puisque l’on est passé de l’analyse du risque centrée sur l’aléa à une amélioration de la compréhension du risque par la prise en compte conjointe de l’aléa et de la vulnérabilité [Provitolo, 2002]. Les études du risque par l’intermédiaire des éléments exposés se sont développées, le risque étant alors considéré comme une combinaison entre un **aléa**, phénomène potentiellement destructeur d’origine diverse (naturelle, anthropique), et une **vulnérabilité**.

Depuis quelques années, une partie de la communauté scientifique et des acteurs en charge de la gestion des risques s’accordent à considérer le risque comme le résultat de la combinaison entre un aléa et des enjeux ⁴. Bien que le terme *enjeux* soit employé par de nombreux acteurs et scientifiques, nous lui préférons le terme *éléments exposés* ou *éléments vulnérables*, dont la définition nous semble moins prêter à confusion. Nous retiendrons la définition du risque suivante (équ. 1.1) :

$$R = f(A, V) \tag{1.1}$$

où R est le risque, A l’aléa, V la vulnérabilité des éléments exposés, f une fonction considérée comme un produit par certains [Degardin *et al.*, 2001 ; Dauphiné, 2001], un croisement [MEDD et METLTM, 2002], une combinaison (Institut des Risques Majeurs (IRMa ⁵), dans [Griot et Ayrat, 2002]) voire une superposition ou une convolution par d’autres [Madariaga et Perrier, 1991] ⁶. Ces différences de définition de la fonction reliant aléa et vulnérabilité sont dues à des approches disciplinaires et à des outils d’analyse des risques variés. Dans le cadre de ce travail, nous adopterons la définition proposée par l’IRMa, qui considère que le risque est le résultat d’une combinaison entre un aléa et des éléments vulnérables.

³Bien que les études du géographe américain G. White sur les risques aient débuté en 1935 [White, 1945], ses recherches, poursuivies par I. Burton et R. Kates au sein de l’École de Chicago, atteignent un point culminant dans les années 1970-1980 [Burton *et al.*, 1978].

⁴Il s’agit notamment de la définition du Ministère de l’Écologie et du Développement Durable et de celle de l’ONU, proposée en 2001 sur le site internet du “United Nations International Strategies for Disaster Reduction (UN/ISDR)” et recueillie par C. Griot et P.-A. Ayrat pour le Groupe des Écoles des Mines en 2002 [Griot et Ayrat, 2002].

⁵L’ensemble des sigles et acronymes utilisés dans le présent travail est détaillé en annexe 1.

⁶Les notions de *croisement* et de *combinaison* ne sont pas clairement décrites par les auteurs de ces définitions.

Les deux composantes du risque, aléa et éléments vulnérables, sont nécessaires à la définition d'un risque (fig. 1.1) ; le risque n'existe pas si les deux composantes ne sont pas en co-présence. En effet, un tremblement de terre se produisant dans le désert ne générera pas de risque ; à l'inverse, le risque sera théoriquement nul si une ville de trois millions d'habitants est exposée à aucun aléa (ce qui correspond à une situation très théorique et peu réaliste).

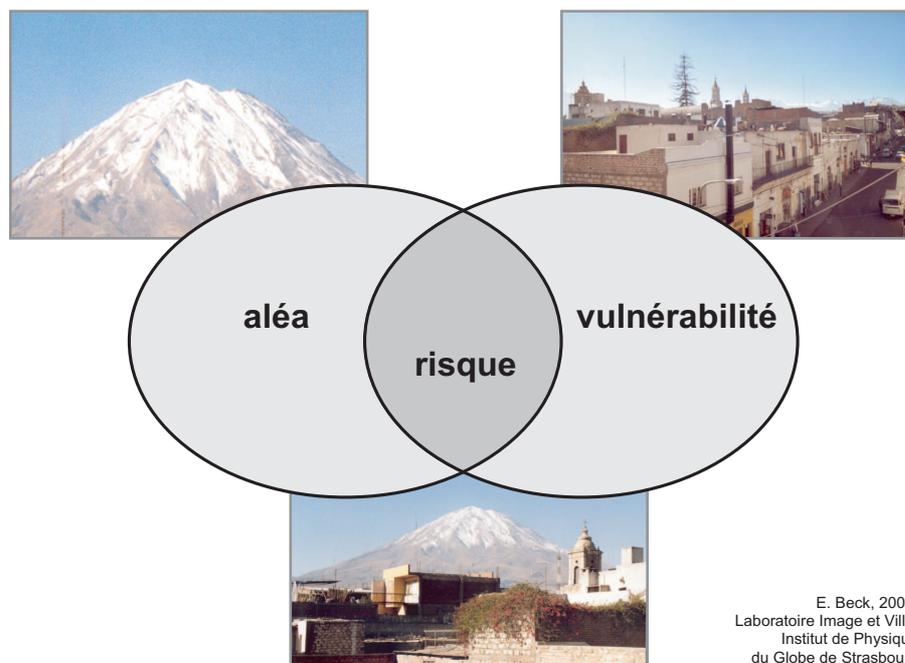


FIG. 1.1 – Définition du risque : Arequipa (Pérou), au pied du volcan El Misti. Le risque est le résultat de la combinaison d'un aléa et d'éléments vulnérables.

Cependant, on peut aller plus loin que cette simple relation, car d'autres facteurs entrent en jeu dans la définition du risque et dans sa variabilité. Comme le souligne N. Meschinet de Richemond [Meschinet de Richemond, 2003], le risque possède également une dimension temporelle. Le risque est également (et nécessairement) caractérisé par une dimension spatiale qu'il faut prendre en compte [Propeck-Zimmermann, 2003]. On peut ainsi évoluer vers une définition plus complexe du risque, qui prendrait en compte ces deux nouveaux facteurs (équ. 1.2) :

$$R = f(A(t, s), V(t, s)) \quad (1.2)$$

avec R le risque, A l'aléa, V la vulnérabilité des éléments exposés, t le temps et s l'espace.

Nous allons à présent définir les deux composantes du risque, l'aléa et la vulnérabilité.

1.1.2.2 L'aléa

L'aléa est le phénomène destructeur observé, que l'on cherche à quantifier. Il est caractérisé par une probabilité d'occurrence, qui est l'inverse de sa période de retour (si elle existe), une extension spatiale et une intensité⁷. Les conséquences de l'aléa sur les éléments exposés dépendent de ces deux derniers facteurs.

Dans le contexte des risques technologiques, ou plus largement des risques d'origine anthropique, le terme *aléa* est peu souvent employé [Martin, 2004], car il implique un caractère aléatoire auquel l'accident industriel peut ne pas répondre puisque souvent causé par l'homme. Cependant, l'expression *aléa technologique* s'est répandue depuis quelques années, notamment dans la législation française [DPPR-MEDD *et al.*, 2005]. Le Ministère de l'Écologie et du Développement Durable définit l'aléa industriel, par analogie avec l'aléa naturel, comme une "probabilité de manifestation d'un phénomène accidentel sur un site industriel"⁸. C'est pourquoi nous l'adopterons dans le cadre de ce travail.

L'aléa peut être évalué par l'intermédiaire de deux approches : l'approche déterministe, visant à définir l'intensité maximale d'un événement susceptible de se produire dans une zone d'étude donnée ; l'approche probabiliste, qui détermine la probabilité d'occurrence d'un phénomène d'intensité donnée. Le choix de l'échelle de l'étude, dont nous discuterons plus en détails dans un paragraphe suivant, est capital, car l'aléa n'a pas les mêmes caractéristiques selon que l'on se place à une échelle locale, régionale ou nationale.

Quelle que soit la méthode choisie, l'évaluation de l'aléa fait appel à différents outils et ressources :

- **inventaire** : à partir de témoignages, de documents cartographiques anciens, d'archives textuelles (registres paroissiaux, presse écrite, correspondance, récits...), documents iconographiques variés (sculptures, cartes postales, peintures...), des bases de données recensant les événements du passé sont constituées ;
- **observation/surveillance** : les réseaux de stations de mesure permanents et les satellites enregistrent continuellement des données météorologiques, volcaniques, sismologiques, etc. Ils sont utilisés dans un objectif opérationnel (surveillance) et scientifique (connaissance des phénomènes) ;
- **modélisation** : des modèles, couplés aux bases de données (issues de l'analyse des archives ou des réseaux de surveillance), permettent de reconstituer des catastrophes afin d'en comprendre les mécanismes ou simuler des scénarios dans l'objectif d'en évaluer les conséquences ;
- **la simulation à échelle réduite** : la compréhension de l'aléa et plus exactement des manifestations du phénomène destructeur passe également par sa simulation à échelle réduite en laboratoire : on peut citer par exemple les tables vibrantes du CEA (commisariat à l'énergie atomique) qui reproduisent les effets d'un séisme sur des maquettes de bâtiments. Dans ce cas, le problème de transférabilité des résultats à des échelles plus grandes se pose.

⁷L'intensité s'exprime en grandeurs physiques différentes selon le type d'aléa : pour les mouvements de terrain, l'intensité dépendra du volume de terrain déplacé et de l'extension spatiale de la zone de décrochement ; dans le cas d'inondations, la hauteur d'eau atteinte par un cours d'eau ou la hauteur d'eau précipitée permettront de quantifier l'aléa ; pour les séismes, on utilisera la magnitude, l'intensité ou l'accélération des ondes, etc.

⁸Source : www.prim.net, consulté début 2006.

1.1.2.3 La vulnérabilité des éléments exposés

Les éléments exposés correspondent à la population, aux bâtiments et autres infrastructures humaines (réseaux de communication, réseaux de transports...), aux activités humaines (économiques, de loisirs, de service...) et au patrimoine culturel et environnemental (monuments, paysages, biodiversité...). Ils sont caractérisés par une vulnérabilité, différente selon la nature de l'élément exposé (la vulnérabilité d'un bâtiment n'est pas celle d'un axe de réseau de communication). De plus, il n'y a pas de vulnérabilité intrinsèque, mais bien une vulnérabilité par nature d'aléa. Par exemple, une maison construite aux normes parasismiques est prévue pour résister aux séismes. Cependant, si elle est localisée en zone inondable, sa vulnérabilité face aux inondations est élevée, alors qu'elle est faible face aux séismes.

Les définitions de la vulnérabilité varient selon les auteurs, les communautés scientifiques, les disciplines et les écoles. Elles varient également selon les époques. Pendant longtemps, la communauté des géographes français a étudié la vulnérabilité par son entrée par l'aléa, en insistant sur la notion d'endommagement [Léone *et al.*, 1995] voire de coût (valeur économique). En France, des auteurs comme R. D'Ercole ou A.-C. Chardon [D'Ercole, 1994 ; Chardon, 1994] ont intégré une valeur sociale et culturelle dans l'étude de la vulnérabilité à partir de la moitié des années 1990.

A la lecture des travaux entrepris depuis une dizaine d'années, plusieurs types de vulnérabilité peuvent être identifiés :

- **la vulnérabilité physique ou technique** [Chardon, 1994 ; D'Ercole, 1996 ; Glade, 2003 ; André, 2004 ; Minciardi *et al.*, 2005 ; Veyret, 2006], qui caractérise le taux d'endommagement potentiel des éléments exposés et intègre le concept de résistance, qui fait référence à un seuil de rupture ;
- **la vulnérabilité fonctionnelle**, qui est la "propension d'un élément ⁹ à avoir des pertes de fonctionnalités" [Minciardi *et al.*, 2005] ;
- **la vulnérabilité systémique**, qui prend en compte d'éventuels effets dominos [Minciardi *et al.*, 2005] ;
- **la vulnérabilité sociale** ¹⁰ [D'Ercole, 1996 ; Adger, 2000 ; Cutter *et al.*, 2000 ; King *et al.*, 2000 ; Veyret, 2006], définie par S. Cutter comme la possibilité d'un groupe social de subir des pertes suite à un événement dommageable ou comme la résilience ¹¹ d'un groupe social face à des risques [Cutter *et al.*, 2000]. Elle dépend de facteurs de vulnérabilité de la population ;
- **la vulnérabilité biophysique ou des lieux** [Cutter *et al.*, 2000 ; Cutter *et al.*, 2003], plus proche de la notion d'exposition et qui, combinée à la vulnérabilité sociale, permet d'aboutir à la notion de vulnérabilité territoriale [Bonnet, 2002 ; Cutter *et al.*, 2003].

⁹Personne, bien ou service.

¹⁰La définition donnée ici est différente de celle proposée par A. Dauphiné [Dauphiné, 2001], qui reprend celle donnée par J.-R. Bartélémy [Bartélémy, 1998].

¹¹Résilience : capacité d'un système ou d'une partie de ce système à absorber l'occurrence d'une catastrophe [Timmerman, 1981].

La vulnérabilité des éléments exposés est influencée par différents facteurs, qui vont avoir tendance à l'augmenter ou la diminuer. Nombreux sont les auteurs qui se sont appliqués à décrire ces facteurs. La classification de J.-C. Thouret et R. D'Ercole nous a semblé intéressante car elle synthétise les différentes propositions de classement [Thouret et D'Ercole, 1996] :

- facteurs structurels :
 - facteurs socio-démographiques et économiques : structure et mobilité de la population (densité de population, rythmes de croissance, ressources, activité professionnelle, niveau de formation et de scolarisation, état sanitaire et alimentaire, migrations quotidiennes, type de quartier urbain), renouvellement de la population, origine démographique et migrations, relations avec les campagnes environnantes, associations et communautés (cohésion, stabilité, inégalités sociales) ;
 - facteurs socio-culturels : cognitifs, éducatifs, perceptifs ; connaissances acquises et expériences des sinistres vécus, existence et qualité de la prévention et des solutions de défense envisagées, perception du risque par l'individu et le groupe ;
 - facteurs physiques, techniques et fonctionnels : extension et qualité du bâti et des infrastructures, structure, réseau et qualité opérationnelle des instances chargées de la prévention et de la protection civile, accessibilité et disponibilité des secours et plans d'intervention ;
 - facteurs institutionnels et politico-administratifs : appareil législatif et réglementaire, programme de prévention des risques ;
- facteurs géographiques et conjoncturels :
 - facteurs géographiques : paramètres spatio-temporels de l'aléa, réactions en chaîne ;
 - facteurs conjoncturels ou contingents : dysfonctionnements urbains et techniques imprévisibles : travaux publics sur une voie habituellement utilisée par les secours . . .

Dans le cadre de ce travail, il nous a semblé important de pouvoir prendre en compte différentes vulnérabilités : celle des bâtiments, qui correspond à une vulnérabilité physique et technique prenant en compte sa résistance, une vulnérabilité fonctionnelle, qui tient compte du fonctionnement d'un système urbain, et la vulnérabilité de la population, par l'intermédiaire de la densité et de la représentation cognitive des risques, intégrant ainsi une dimension sociale (cf. définition de R. D'Ercole, S. Cutter, etc. [D'Ercole, 1996 ; Cutter *et al.*, 2000]).

1.1.2.4 Exposition

Il est difficile de parler de risque et d'éléments exposés vulnérables sans aborder la notion d'*exposition*. L'exposition à un aléa peut être définie comme le fait d'être soumis aux effets redoutés et potentiels d'une source de danger. Elle peut être représentée cartographiquement par l'extension spatiale d'un aléa d'une intensité donnée : la notion d'exposition ne prend pas en compte la probabilité d'occurrence, à l'inverse de l'aléa.

Ce terme est davantage approprié lorsqu'on parle de population ou de biens, mais nous étendrons sa définition à tout espace pouvant être affecté par la réalisation d'un aléa donné, qu'il s'agisse d'un espace bâti ou non. Cette extension prend tout son sens dans l'aménagement urbain, puisqu'une réflexion sur l'occupation et l'utilisation d'un espace exposé à un aléa pourra être engagée selon le degré d'exposition. D'autres auteurs ont souhaité également qualifier cette exposition des espaces non bâtis mais ont utilisé d'autres termes comme *vulnérabilité spatiale* [Barczak et Grivault, 2005] ou *vulnérabilité des lieux* [Cutter *et al.*, 2000].

1.1.2.5 Risques majeurs

Les risques peuvent être classés selon leur nature (géologiques, hydro-météorologiques, industriels, sanitaires...), leur dispositif (techniques, législatifs, éducatifs...) mais aussi selon leur intensité. Ainsi, on qualifie certains risques de mineurs¹², les autres de majeurs. Dans notre cas, nous ne traiterons que du risque majeur.

Le risque majeur est caractérisé par une faible occurrence et une gravité importante, engendrant un nombre élevé de victimes et de nombreux dommages matériels et environnementaux. Rappelons la définition qu'en donne Haroun Tazieff (non daté) :

“La définition que je donne du risque majeur, c'est la menace sur l'homme et son environnement direct, sur ses installations, la menace dont la gravité est telle que la société se trouve absolument dépassée par l'immensité du désastre”.

Les risques majeurs peuvent être classés en différentes catégories. La classification la plus répandue consiste à distinguer d'une part les risques naturels (inondations, feux de forêt, mouvements de terrain, avalanches, séismes, volcans, cyclones, tempêtes), d'autre part les risques technologiques (risques industriels, risque de rupture de barrage, risque de transport de matières dangereuses, risque nucléaire). J.-F. Gleyze distingue deux autres catégories de risques qui ne sont pas nécessairement majeurs et relèvent davantage de nuisances pour certains d'entre eux : les risques urbains (classés en trois sous-catégories, les risques bâtimentaires, les risques de réseaux et les risques de société) et les risques sanitaires et environnementaux (toxicité, pollutions, insalubrité, épidémies, maladies, risques alimentaires) [Gleyze, 2002].

1.1.2.6 Catastrophe

La catastrophe correspond à la réalisation du risque majeur. Elle correspond à l'occurrence d'un phénomène d'une intensité plus ou moins élevée et aux conséquences plus ou moins dramatiques sur les éléments exposés. Il n'y a pas nécessairement de relation entre le niveau d'aléa et le niveau de la catastrophe ; les pertes humaines et financières dépendent beaucoup des circonstances dans lesquelles a lieu l'événement. Ainsi, l'heure, le jour de la semaine, la période de l'année, les conditions météorologiques ou conjoncturelles influenceront sur les pertes et les dommages. Un tremblement de terre qui se produit de nuit en semaine, surprenant la population dans son sommeil, n'aura pas les mêmes conséquences s'il survient un dimanche après-midi ensoleillé, alors que la population se trouve en majorité à l'extérieur des bâtiments.

Les niveaux d'événements destructeurs, de l'accident à la super-catastrophe, peuvent être établis en fonction des pertes humaines, financières ou même en biomasse [Dauphiné, 2001]. Le tableau 1.1 décrit cette échelle et les dommages associés à chaque niveau.

La revue de ces différentes notions montre le caractère pluridisciplinaire du risque, qui peut être étudié par des disciplines et, en conséquence, des approches, méthodes et outils variés.

¹²C. Hiegel définit le risque technologique mineur comme “un risque à forte probabilité qui est rapidement maîtrisé, car lié à un dysfonctionnement technique connu et dont les conséquences sont limitées dans le temps et l'espace” [Hiegel, 2001]. Bien qu'il s'agisse d'une définition appliquée au risque technologique, nous retiendrons les notions de probabilité élevée et de conséquences limitées dans le temps et l'espace pour définir le risque mineur.

Type d'événement	Niveau	Pertes humaines (nombre de victimes)	Pertes financières (millions d'euros)	Pertes écologiques (tonnes de biomasse)
Accident	I	0-9	0-15	0-99
Désastre	II	10-99	0-1 500	0-9 999
Catastrophe	III	100-9 999	≥ 0	0-999 999
Catastrophe majeure	IV	10 000-99 999	≥ 15	≥ 10
Super-catastrophe	V	$\geq 100 000$	≥ 150	≥ 10

TAB. 1.1 – Échelle des événements selon le nombre de victimes, les pertes financières et les pertes de biomasse. Les trois derniers types d'événements correspondent à des catastrophes. Adapté de Dauphiné, 2001.

1.1.3 Dimension sociale des risques

Les différentes définitions du risque, de l'aléa, des risques majeurs et de la catastrophe laissent peu de place à la dimension sociale des risques. Seule la vulnérabilité de la population permet de l'appréhender. Cette dimension sociale nous semble d'autant plus importante qu'elle intervient dans la construction du risque, au même titre que l'aléa. Selon nous, elle intervient notamment par l'intermédiaire de la représentation cognitive des risques et par la culture des risques.

1.1.3.1 Représentation cognitive des risques et relation avec la vulnérabilité

La culture des risques repose, entre autres, sur l'éducation et sur des perceptions. Mais plus que de perception, il est préférable de parler de représentation cognitive, puisque, comme définie par C. Cauvin [Cauvin, 1984], "la perception est l'ensemble des mécanismes et des processus par lesquels l'organisme prend connaissance du monde et de son environnement sur la base des informations élaborées par ses sens", alors que la représentation cognitive est le résultat d'une perception (qui fait appel aux cinq sens), mais également de croyances, d'informations indirectes, différées, inconscientes. Elle ne nécessite pas une connaissance précise de l'objet et n'implique pas de l'avoir vu ou "perçu" par un autre sens, d'être en sa présence. Le risque, bien souvent, n'est matérialisé que par la catastrophe. Son caractère dangereux n'apparaît pas directement ou ne peut être perçu par nos sens : qui se douterait qu'un petit ruisseau puisse, un jour d'orage, se transformer en torrent dévastateur et ravageur ? Qui pourrait imaginer qu'une usine dont les émanations odorantes sont agréables puisse un jour être à l'origine d'une explosion meurtrière ? *A fortiori*, celui qui en a connaissance est capable d'identifier les sources de danger (ceci souligne à nouveau l'importance du savoir dans la représentation cognitive des risques). L'inverse est également vrai, on peut attribuer à une mauvaise odeur ou à une cheminée qui rejette d'importantes fumées blanches une sensation de danger, qui peut pourtant s'avérer injustifiée. Il s'agit donc bien de vues de l'esprit, d'images que se forgent les individus sur des impressions, du vécu, des connaissances, des ouï-dire, des sensibilités plus ou moins développées, une familiarité, etc. Cependant, dans certains cas, le risque laisse des traces dans le paysage et les sens peuvent

être alertés par une odeur nauséabonde, la vue de la laisse d'inondation¹³ suivant une crue importante, autant d'indices suggérant l'existence d'un risque réel [Glatron et Beck, 2005]. Il est donc plus approprié de parler de représentation cognitive des risques plutôt que de perception.

La vulnérabilité d'un individu est liée à sa représentation cognitive du risque auquel il est réellement exposé, car nous considérons que ses comportements en cas de crise peuvent dépendre de cette représentation. Les liens entre représentation cognitive de l'environnement et comportements dans l'espace (sa mobilité, notamment) ont été étudiés dans les années 1960 par les géographes du comportement américains, qui se sont largement inspirés des travaux développés en psychologie cognitive et en éthologie [Lynch, 1960, *in* Debarbieux, 1988]. Si l'on transfère cette relation à la thématique des risques, dans le cas d'une catastrophe, les comportements des individus peuvent dépendre de leur représentation des risques, mais également de la cinétique et de l'ampleur de cette catastrophe. Peu d'études ont permis d'établir une réelle corrélation entre comportement et représentation des risques. Celle menée par M. Lindell et V. Barnes [Lindell et Barnes, 1986, *in* Denis, 1998] est pourtant un exemple en ce sens, puisqu'elle montre une certaine relation entre l'évacuation massive de Three Miles Island et la perception du risque nucléaire avant l'accident : à cette occasion, les autorités ont suggéré une évacuation préventive des femmes enceintes et des enfants et préconisé un confinement pour les autres. Il s'en est suivi une évacuation massive, l'ensemble des habitants ne pensant pas qu'il y avait des différences entre eux et ces deux groupes particuliers. Il s'est également avéré que les personnes localisées en dehors de la zone de danger se sentaient exposées à un risque élevé et ont également quitté leur domicile à tort. De même, S. Cutter résume les résultats de recherches menées par des géographes de l'Université du Colorado comme G. White en montrant que la proximité de la source de danger et l'expérience influencent les comportements de prévention [Cutter, 1993, *in* Denis, 1998] : "les gens ne reconnaissent pas qu'ils vivent dans un environnement à risque ; pour ce qui est des événements à forte probabilité, les jugements collectifs sur la probabilité de dommages ou de blessures ne diffèrent pas du jugement des experts ; ces jugements divergent cependant dans le cas des événements à faible probabilité".

On peut donc avancer que, dans le cas d'un événement majeur mais pas cataclysmique¹⁴ ou encore à cinétique lente à moyenne, la représentation des risques peut jouer sur le comportement. Si l'individu sous-estime le risque auquel il est exposé, on peut supposer qu'il n'identifiera pas facilement la nature du phénomène, n'aura pas connaissance des consignes de sécurité à adopter (par exemple, se confiner en cas d'accident industriel, couper le courant électrique et se mettre sur un point haut dans le cas d'une inondation). Dans un autre contexte, sa vulnérabilité est encore plus élevée s'il pense connaître les consignes à suivre mais que celles-ci sont incorrectes. S'il surestime le risque auquel il est réellement exposé, lorsqu'une catastrophe survient, il est susceptible d'adopter des comportements sur-dimensionnés qui le mettront en danger : aller chercher ses enfants, se déplacer et aller dans une zone de danger, utiliser son téléphone, alerter les services de secours qui pourraient se déplacer inutilement. . .

Par contre, si l'intensité de l'événement est très élevée, on ne peut considérer que la représentation va intervenir dans les comportements de l'individu, puisque c'est avant tout un instinct de survie qui va opérer. Mais encore faut-il avoir le temps de réagir ! Si la catastrophe est caractérisée par une cinétique rapide, comme c'est le cas d'un séisme, l'individu

¹³Laisse d'inondation : indication du niveau atteint par les plus hautes eaux et matérialisé par des déchets dans les arbres et des traces laissées par l'eau sur les bâtiments.

¹⁴Cataclysmique : dont l'intensité est suffisamment importante pour produire un bouleversement de la surface du globe.

peut tout simplement ne pas avoir le temps de réagir et dans ce cas sa vulnérabilité ne sera pas dépendante de sa représentation du risque sismique mais davantage du lieu où il se trouve, dans un bâtiment ou non, au rez-de-chaussée ou au dixième étage... La représentation cognitive du risque peut par contre intervenir en cas de réplique, si l'individu a survécu. Ce dernier aura eu désormais le temps d'identifier le type de phénomène auquel il est confronté et sera davantage susceptible d'appliquer des consignes adéquates pour se mettre en sécurité.

Notons cependant que la corrélation entre représentation cognitive et comportement est peu étudiée, que les résultats des quelques études réalisées peuvent s'avérer contradictoires : dans le cas de M. Lindell et V. Barnes [Lindell et Barnes, 1986], la relation semble vérifiée, alors qu'A. Lalo *et al.* ont montré une faible correspondance [Lalo *et al.*, 1993]. Il apparaît que les différences de résultats sont également liées au type de phénomène et à l'ampleur de la catastrophe.

1.1.3.2 Culture des risques

D'après S. Glatron, la culture des risques correspond à un "savoir, un bagage collectif commun à tous ceux qui appartiennent à une société" [Glatron, 2003, p. 71]. D'après Y. Veyret et N. Meschinet de Richemond, "la culture du risque peut être définie comme une connaissance et une perception de la menace communes à un groupe" [Veyret et Meschinet de Richemond, 2003, p. 37]. La culture des risques est le résultat d'une construction collective. Elle repose sur des perceptions et un savoir, inné ou acquis. Ce savoir peut porter sur les risques eux-mêmes, d'une manière générale et/ou ramenés à un contexte local, mais également sur les consignes à suivre en cas de catastrophe. L'acquisition du savoir sur les risques se fait par l'éducation, c'est-à-dire l'éducation parentale (qui sous-entend une transmission des connaissances de génération en génération) et l'apprentissage à l'école. Elle se fait également par les campagnes d'information et les exercices grandeur nature. Pour que puisse naître une culture des risques, l'acquisition du savoir ne suffit pas, leur appropriation¹⁵ est également nécessaire.

La culture des risques varie d'une société à une autre et est largement influencée par les contextes politique, social et religieux des sociétés et leur degré d'exposition aux aléas. Concernant les tremblements de terre, l'acculturation du risque par la population japonaise est exemplaire [Veyret, 2001]. D'après une étude visant à comparer les différences de culture des risques entre les habitants de Kanzawa (Japon) et ceux de San Fernando (Californie), les premiers citent le risque sismique et la pollution en priorité, alors que les Californiens sont davantage préoccupés par les risques sociaux (criminalité, avenir de la famille et des enfants) [Dauphiné, 2001]. De cette différence de culture dépendent également les comportements pré-catastrophiques d'une population. Les habitants de Kanzawa ont tendance à pratiquer des exercices visant à améliorer leurs réactions en cas de catastrophe et à intégrer les consignes de sécurité à suivre (fig. 1.2), alors que ceux de San Fernando préfèrent contracter une assurance et faire des réserves alimentaires [Dauphiné, 2001].

L'exemple suivant permet d'illustrer les conséquences tragiques d'une différence de culture des risques. Lorsque la vague du tsunami a déferlé sur les côtes indonésiennes le 26 dé-

¹⁵L'appropriation des connaissances sur les risques renvoie aux processus d'intégration de ces connaissances, jusqu'à ce que l'individu fasse sien ce savoir. Dans le cas des consignes de sécurité, un individu va se les approprier à partir du moment où il les aura comprises, acceptées, intégrées et qu'elles deviendront des réflexes.



FIG. 1.2 – Exemple d'exercice d'évacuation dans une école primaire de Tokyo. Photo : Toshihiko Kono, 2005. L'organisation d'exercices d'évacuation dès le plus jeune âge, notamment à l'école, permet de faire naître une véritable culture des risques.

cembre 2004, en l'absence de système d'alerte et d'information ¹⁶, les habitants de la province d'Aceh ne se sont pas mis à l'abri immédiatement. Sur les 227 000 morts causés par la catastrophe, 126 000 personnes habitaient cette province [Schneegans, 2005], qui comptait 4.8 millions d'habitants avant le tsunami. Pourtant, les côtes indonésiennes, et plus particulièrement l'île de Florès, au sud de l'archipel, avaient déjà été touchées par un tsunami en 1992, qui avait fait plus de 2 000 victimes. A l'opposé, sur la petite île de Simeulue ¹⁷, pourtant localisée à proximité de l'épicentre, à peine 7 victimes (pour une population de 70 000 habitants) ont été dénombrées. C'est le tremblement de terre lui-même, qui a détruit 90 % des bâtiments côtiers, et non pas la vague, qui a fait des victimes. Il est transmis de génération en génération que si la mer se recule brusquement, il faut se mettre à courir vers les terres pour s'élever et se mettre à l'abri [Gaillard et Clavé, 2006]. De plus, la mémoire des catastrophes est grande, puisque l'île avait déjà été touchée par un tsunami en 1907, qui avait fait des milliers des victimes. La religion a aussi un poids important dans la culture des risques, comme c'est le cas pour les habitants d'Aceh, qui considèrent que les catastrophes naturelles constituent un châtimeur divin qui ne se produit qu'une seule fois dans une vie. Ils adoptent alors une attitude fataliste face à ces événements et considèrent qu'il est inutile de se protéger contre un potentiel tsunami, puisque, d'après eux, cela ne se reproduira plus. La réaction de la population de Java, touchée le 27 mai 2006 par un séisme de magnitude 6.6, est aussi déconcertante. Les habitants, ayant souvenir de la catastrophe du 26 décembre 2004, se sont mis à l'abri sur des terrains plus élevés, par crainte d'un tsunami. Malheureusement, ils se sont exposés à un autre risque, celui de l'éruption volcanique du Merapi, puisque c'est sur les pentes de ce volcan que les populations se sont

¹⁶La culture des risques n'est pas la seule responsable de cette tragédie ; la proximité de l'épicentre du séisme par rapport aux côtes, l'absence de système d'alerte et la mauvaise gestion des risques par les autorités sont également en cause.

¹⁷L'île de Simeulue est localisée à 300 km au SSE de Banda Aceh et à une centaine de kilomètres au SSW des côtes de Sumatra.

réfugiées ¹⁸. Pourtant, les enseignements du tsunami de fin 2004 n'ont pas encore porté leurs fruits : le dysfonctionnement du système d'alerte est en partie responsable des centaines de victimes du tsunami du 17 juillet 2006 qui a à nouveau frappé l'île de Java, suite à un séisme de magnitude 7.2, mais la faible culture du risque est également montrée du doigt.

Cet exemple illustre bien que la culture du risque peut varier fortement sur de faibles distances géographiques, et qu'elle peut grandement influencer les conséquences d'une catastrophe ; enfin, qu'il est important d'en tenir compte dans un processus de réduction des risques par la réduction de la vulnérabilité. L'exemple du tsunami nous amène donc à envisager *des cultures du risque*, au pluriel [Glatron, 2003], puisque d'un groupe à un autre, d'une société à une autre, des différenciations peuvent être observées. La notion de culture suggère une conception identique d'une communauté. A l'inverse, les représentations cognitives concernent les individus, même si certaines communes à un groupe peuvent être observées [Denis, 1998 ; Bonnet, 2002].

1.1.4 Dimension spatiale des risques

L'étude des risques en géographie induit nécessairement de considérer leur dimension spatiale. La multiplicité des cartes utilisées pour représenter les différentes composantes des risques montre l'importance de leur dimension spatiale. Le risque est potentiel et invisible : sa représentation cartographique permet de le formaliser, de le rendre visible. La carte du risque permet d'en apprécier l'étendue et les limites, qui sont plus ou moins floues et incertaines.

La dimension spatiale du risque peut être appréhendée par l'étude de son territoire. La notion de territoire est polysémique : considéré par certains comme un synonyme d'espace ou de lieu, il est associé par d'autres à un espace borné (le territoire français) ou à un espace approprié [Lévy, 1999, *in* November, 2002]. Le territoire du risque est conditionné par le type d'aléa (le territoire du risque sismique n'est pas le même que celui du risque industriel) et par ses effets indirects. Si le risque résulte du croisement entre un aléa et une vulnérabilité, en revanche, le territoire du risque n'est pas nécessairement le résultat de l'intersection entre l'aire de l'aléa et celle de la vulnérabilité. Le territoire du risque peut s'étendre bien au-delà de cette intersection, lorsque, par exemple, des entreprises localisées à l'extérieur de ce territoire emploient des sous-traitants dont les sites d'attache sont, eux, localisés dans un secteur dangereux [Pottier, 2006]. En cas de catastrophe, si les entreprises sous-traitantes sont affectées et ne sont plus en mesure de fonctionner normalement, l'entreprise qui loue leurs services en pâtit et est ainsi indirectement touchée par les effets de la catastrophe. Ainsi, le territoire du risque s'élargit dès lors que les effets indirects d'une catastrophe sont pris en compte, notamment à travers les réseaux et les flux qui, s'ils sont perturbés, peuvent entraîner des ruptures de stock, du chômage technique, etc. Il est difficile de gérer et d'intégrer ces effets indirects dans les scénarios ; c'est pourquoi ils sont actuellement peu pris en compte dans les plans d'urgence.

La dimension spatiale du risque constitue également un facteur important de l'appropriation du risque. Nous supposons, car cela reste à vérifier, que, lorsqu'un individu est exposé à un aléa donné (industriel par exemple), qu'il ne s'y sent pas exposé alors qu'il a connaissance de cet aléa (il sait que des industries dangereuses se trouvent dans sa région), cela

¹⁸Wassmer, P., 2006 : communication personnelle.

est dû à une absence d'appropriation du risque en raison d'une méconnaissance de son extension spatiale, d'où l'intérêt de fournir une information spatialisée sur les risques, aux acteurs comme à la population.

1.1.5 Dimension législative des risques

La dimension spatiale des risques prend tout son sens dans leur gestion préventive puisque la prévention des risques par l'aménagement est basée sur l'élaboration de plans. Dans le cadre de la législation française, un certain nombre de plans ont été créés au cours du siècle dernier, au rythme des catastrophes et des accidents meurtriers. Se sont succédés : les plans de surfaces submersibles (PSS, 1935) visant à réduire les risques d'inondation, les plans particuliers d'intervention (PPI, 1987) visant à organiser la gestion des secours en cas d'accident sur un site dangereux (barrage, industrie chimique...), les plans de zones sensibles aux incendies de forêts (PZIF, 1991), les plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR, 1995) et les plans de prévention des risques technologiques (PPRT, 2003). Tous ces plans (excepté les PPI) ont pour principal objectif la maîtrise de l'urbanisme dans les zones d'aléa élevé.

Concernant le risque sismique, il n'existe pas réellement de plan (excepté le PPR sismique, qui est cependant peu répandu à l'heure actuelle). La réglementation porte principalement sur le respect des normes parasismiques, conformément au décret n°91-461 du 14 mai 1991, relatif à la prévention du risque sismique. Ces normes sont appliquées suivant un zonage sismique défini à partir d'une carte d'aléa sismique.

En novembre 2005, les autorités françaises ont mis en place un "Plan Séisme". Il ne s'agit pas d'un plan au sens cartographique du terme mais d'un programme sur six ans visant à réduire à la vulnérabilité aux séismes des personnes et des biens. Ce programme s'organise autour de quatre axes, dont le premier consiste à approfondir la connaissance scientifique de l'aléa, du risque et mieux informer sur celui-ci ; le deuxième axe porte sur l'amélioration de la prise en compte du risque sismique dans la construction. L'un des objectifs du Plan Séisme est de développer les études locales du risque dans les secteurs les plus vulnérables (microzonages et scénarios). A l'échelle nationale, il s'agit également d'améliorer la connaissance de l'aléa par l'élaboration d'une nouvelle carte de l'aléa sismique prenant en compte l'état actuel des connaissances et d'aboutir à une révision du zonage sismique français.

A ces plans s'ajoute une réglementation en matière d'information préventive, conformément aux articles R125-10 et R125-11 du code de l'environnement. Cette information préventive est obligatoire depuis le décret n°90-918 du 11 octobre 1990 (l'échelle des documents est précisée par une circulaire de 1992). Le préfet est tenu d'élaborer un dossier départemental sur les risques majeurs (DDRM) à l'échelle du département, un dossier communal synthétique (DCS), qui est l'équivalent du DDRM mais appliqué à l'échelle de la commune, à partir duquel le maire peut réaliser un dossier d'information communal sur les risques majeurs (DICRIM). Ce sont des documents déposés en libre consultation dans les mairies et les préfetures et qui peuvent faire l'objet d'une diffusion collective (notamment le DICRIM). Enfin, les maires et les industriels (par l'intermédiaire du PPI) sont chargés de distribuer une information préventive à la population partout où la nature du risque ou la répartition de la population l'exige, dans les locaux communaux, etc.

Comme on peut le constater, la planification des risques s'opère risque par risque (les PPR multi-risques sont encore peu développés), ce qui démontre une approche encore très

sectorisée des risques, qui va pourtant à l'inverse des besoins en termes d'analyse et de gestion.

1.2 La nécessité d'une approche multi-risques intégrée

La connaissance du risque est indispensable à toute gestion efficace de celui-ci. On ne peut pas espérer réussir à limiter un risque si on ne le connaît pas, si on ne possède pas de solides connaissances sur l'aléa comme sur les éléments exposés. Il faut pouvoir caractériser l'aléa et ses composantes, à savoir son intensité, son extension spatiale et sa probabilité d'occurrence. Comment dimensionner correctement des digues si on ne sait pas quelle sera la hauteur atteinte par les eaux ? Comment se protéger d'un aléa qu'on ne connaît pas ? Il ne sera jamais possible de modéliser avec exactitude et prédire avec une extrême précision les modalités de manifestation d'une catastrophe, mais on peut tout au moins essayer de se rapprocher de la réalité.

En résumé, une gestion ciblée des risques nécessite avant tout une bonne connaissance de ceux-ci. Les études des risques peuvent être menées par plusieurs entrées : sectorisée ¹⁹, intégrée ²⁰, mono-sectorielle ²¹ ou multi-risques ²².

1.2.1 Démarche sectorisée et démarche intégrée

Les études centrées sur l'aléa ou la vulnérabilité des éléments exposés, dites études *sectorisées* (fig. 1.3), sont nécessaires à la compréhension des phénomènes, de leurs mécanismes, de leur prévision, de leurs conséquences, du niveau de protection des éléments vulnérables, etc. Mais les études de risques ne prennent un sens, d'après nous, que lorsqu'elles considèrent l'ensemble des composantes et qu'ainsi elles sont *intégrées*. Dans le cadre de ce travail, nous définirons comme *démarche intégrée* une étude prenant en compte l'ensemble des composantes du risque, à savoir l'aléa et la vulnérabilité des éléments exposés. Par exemple, les travaux d'E. Bonnet et d'E. Propeck-Zimmermann *et al.* portent à la fois sur l'aléa technologique et sur la vulnérabilité [Bonnet, 2002 ; Propeck-Zimmermann *et al.*, 2002], ceux de D. Provitolo sur les inondations et les éléments qui y sont exposés [Provitolo, 2002].

Les études sectorisées et pour cette raison disciplinaires ne doivent pas être délaissées, bien au contraire, car elles représentent des sources de connaissances non négligeables pour la mise en œuvre des études intégrées (pluridisciplinaires). Mais il nous semble que l'on acquiert une vision globale beaucoup plus cohérente d'un phénomène lorsqu'on étudie simultanément l'ensemble de ses composantes.

En définitive, si l'optimisation de la gestion des risques nécessite entre autres une amélioration de la connaissance sur ces risques, alors il est primordial d'améliorer nos connaissances sur l'aléa, sur ses manifestations, sur la vulnérabilité des éléments exposés et sur la manière dont la population appréhende ces risques. En résumé, il est important d'adopter une démarche intégrée d'étude des risques.

¹⁹ Approche sectorisée : qui n'aborde qu'une des composantes des risques, l'aléa ou la vulnérabilité.

²⁰ Approche intégrée : qui prend en compte les différentes composantes du risque, aléa et vulnérabilité des enjeux.

²¹ Approche mono-sectorielle : qui n'étudie qu'un seul type de risque à la fois.

²² Étude multi-risques : qui porte sur différents types de risques et prend en compte leurs interactions.

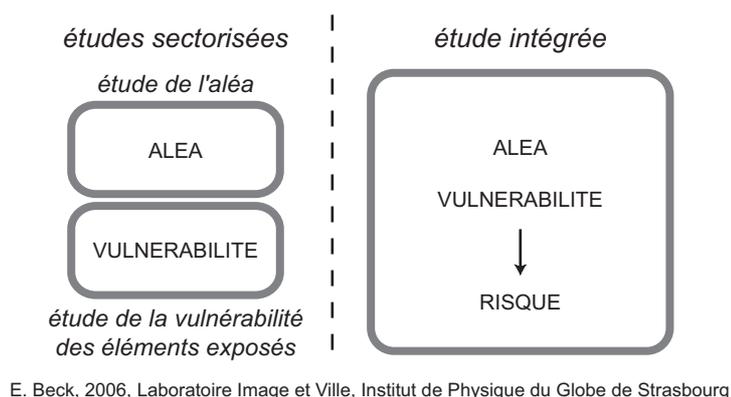


FIG. 1.3 – *Différence entre étude sectorisée et étude intégrée. Une étude sectorisée ne porte que sur l'une des deux composantes du risque (aléa ou vulnérabilité), à l'opposé d'une étude intégrée, qui les prend en compte simultanément.*

1.2.2 Approche mono-sectorielle et approche multi-risques

Une étude mono-sectorielle étudie un risque à la fois, alors qu'une étude *multi-risques* porte sur différents types de risques et prend en compte leurs interactions.

1.2.2.1 Types d'interactions et exemples d'interactions observées

Les risques ne peuvent plus être aujourd'hui étudiés comme des systèmes indépendants les uns des autres puisque, comme nous allons le voir, des interactions sont régulièrement observées. Ces interactions peuvent intervenir de différentes manières selon la nature du phénomène considéré (fig. 1.4). Si l'on considère les catastrophes naturelles et technologiques, quatre cas d'interactions²³ peuvent être rencontrés :

- cas A : entre deux catastrophes naturelles ;
- cas B : entre deux catastrophes technologiques ;
- cas C et D : entre une catastrophe naturelle et une catastrophe technologique, avec deux cas différents selon la nature du phénomène initiateur.

Un phénomène catastrophique naturel peut être à l'origine d'une autre catastrophe naturelle (cas A de la figure 1.4) : en 1969, H. Tazieff [Tazieff, 1969] relate le séisme du Chili de 1960 ($M_W = 9.5$) et décrit sous une forme quasi-romanesque les effets induits par ce terrible tremblement de terre. Ainsi, un séisme peut être à l'origine de mouvements de terrain, de phénomènes de liquéfaction, de tsunamis, comme ce fut le cas le 26 décembre 2004. On peut citer également les effets dominos observés à la suite de pluies diluviennes qui, outre une probable inondation, peuvent entraîner des glissements de terrain, des coulées boueuses, des laves torrentielles, etc.

Des réactions en chaîne peuvent également être observées entre plusieurs aléas d'origine anthropique (cas B de la figure 1.4). L'accident de l'usine AZF de Toulouse, le 21 septembre

²³Il ne s'agit pas à proprement parler d'interactions mais d'action ou de relation de cause à effet : une interaction implique qu'il y ait des actions dans les deux sens (ce qui serait alors symbolisé par une double-flèche). Cependant, nous emploierons le terme d'interactions dans le cadre de ce travail et précisons, en cas de nécessité, s'il s'agit d'une véritable interaction ou d'une simple "action".

2001, fut l'occasion de démontrer la potentialité d'effets dominos en raison de la proximité d'unités industrielles au sein d'un même site. En effet, l'explosion a provoqué des fuites sur un bac d'acide nitrique. Fort heureusement, dans ce cas précis, il n'y a pas eu davantage de réactions en chaîne.

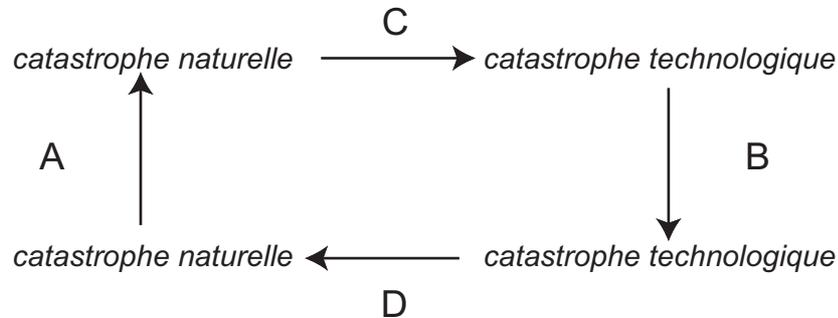


FIG. 1.4 – Différents cas d'interactions entre catastrophes. Trois cas d'interactions sont observés : cas A : entre deux catastrophes naturelles ; cas B : entre deux catastrophes technologiques ; cas C et D : entre une catastrophe naturelle et une catastrophe technologique, avec deux cas différents selon la nature du phénomène initiateur.

Enfin, des interactions entre phénomènes d'origines diverses peuvent avoir lieu : le séisme de San Francisco en 1906 ($M_W = 7.9$ ²⁴) a été particulièrement meurtrier (plusieurs milliers de morts) parce qu'il a été avant tout à l'origine d'un immense incendie, dans une ville dont les bâtiments étaient majoritairement faits de bois (cas C de la figure 1.4). En 1999, le séisme d'Izmit ($M_W = 7.4$; 30 000 morts) a causé beaucoup de dommages et d'effets dominos car l'épicentre était localisé dans l'une des régions les plus industrialisées de Turquie. Des dégâts très importants ont été observés sur une raffinerie (incendies de réservoirs, écroulement d'une cheminée de 115 m de hauteur et de 10 m de diamètre, rupture de pipelines. . . ; fig. 1.5), des usines pétrochimiques, une centrale électrique. . . [INERIS, 2001] : cas C de la figure 1.4. Toujours en 1999, la tempête du 27 décembre a entraîné l'arrêt de la centrale du Blayais ainsi que des inondations (cas A et C de la figure 1.4) [Martin, 2004]. D'autres réactions en chaîne peuvent être supposées : on peut par exemple imaginer qu'un barrage soit fragilisé par un séisme et que la digue de rétention cède, provoquant une inondation²⁵ en aval (cas D de la figure 1.4) un mouvement de terrain peut également affecter des bâtiments où sont entreposés des produits toxiques : les fûts de stockage seraient susceptibles de perdre leur étanchéité et d'occasionner une dispersion de polluants (cas C de la figure 1.4).

L'INERIS²⁶ a analysé les accidents industriels d'origine naturelle [INERIS, 2001] en se fondant sur un certain nombre de bases de données d'accidents²⁷. Il en résulte que, selon les sources, entre 1 et 5 % des accidents technologiques sont déclenchés par un phénomène naturel. Parmi ces accidents, 80 % ont pour origine un phénomène atmosphérique (vent,

²⁴Source : documents pédagogiques de l'EOST, <http://eost.u-strasbg.fr/pedago/Accueil.html>.

²⁵Dans ce cas précis, il ne s'agit pas à proprement parler d'une catastrophe naturelle puisque son origine n'est pas naturelle.

²⁶Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques.

²⁷Les bases de données utilisées sont les suivantes : MARS : Major Accident Reporting System (Union Européenne) ; MHIDAS : Major Hazard Incident Data Service (Royaume-Uni) ; FACTS, une base du TNO, l'organisation de recherche scientifique appliquée des Pays-Bas ; EPA : Environmental Protection Agency (États-Unis).

pluie, orage, foudre, neige...), 8 % sont causés par les tremblements de terre et 9 % par des mouvements de terrain ²⁸.



FIG. 1.5 – Dégâts causés par un incendie sur un réservoir de naphte, dans la raffinerie de Tüpras, suite au séisme d'Izmit en 1999 (source : Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley University). Cette photographie illustre un cas de réaction en chaîne entre un séisme et un accident technologique.

Finalement, si des réactions en chaîne entre catastrophes d'origines diverses ont lieu, elles sont souvent dues à la fragilité des bâtiments et des infrastructures. Si les structures sont correctement dimensionnées pour résister aux aléas naturels, des réactions en chaîne sont peu probables ou, en tous cas, moins susceptibles d'avoir lieu. Il est donc primordial d'étudier leur vulnérabilité, de la caractériser pour identifier les bâtiments qui pourraient ne pas résister à une catastrophe naturelle, afin de les consolider dans la mesure du possible et ainsi éviter toute réaction en chaîne.

1.2.2.2 Études multi-risques et pluri-sectorielles

Étudier l'ensemble des risques auxquels une région est exposée ne signifie pas nécessairement que les interactions entre ces risques sont prises en compte. Par exemple, le DCS est un document d'information réglementaire sur les risques, établi par les services préfectoraux et notifié au maire par le préfet. Il recense l'ensemble des risques auxquels une commune est exposée. Cependant, il s'agit d'un inventaire de ces risques qui ne prend pas en compte les réactions en chaîne. Parallèlement, certaines études de risques procèdent en analysant plusieurs risques différents, mais les uns indépendamment des autres [Cutter *et al.*, 2000 ; Glade et van Elverfeldt, 2005] : nous les qualifierons de *pluri-sectorielles* (fig. 1.6).

Peu de travaux montrent à l'heure actuelle un intérêt pour l'étude des interactions entre risques. Quelques auteurs s'intéressent aux interactions entre risques de nature différente [Barczak et Grivault, 2005], même si la plupart des travaux portent exclusivement sur les risques naturels [Mosquera Machado, 2002].

²⁸ 40 % des accidents d'origine naturelle recensés par les bases FACTS et MHIDAS se sont déroulés aux États-Unis et 30 % en Europe de l'Ouest.

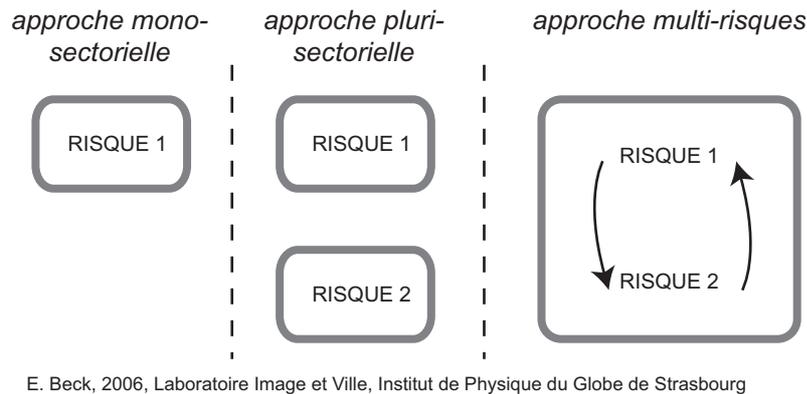


FIG. 1.6 – *Approches mono-sectorielle, pluri-sectorielle et multi-risques. Une étude mono-sectorielle étudie un risque à la fois, alors qu’une étude multi-risques porte sur différents types de risques et prend en compte leurs interactions.*

Au final, nous préconisons le développement des études intégrées multi-risques, qui prennent en compte l’ensemble des composantes des différents risques et qui étudient leurs interactions. La figure 1.7 résume les différents types d’analyse des risques.

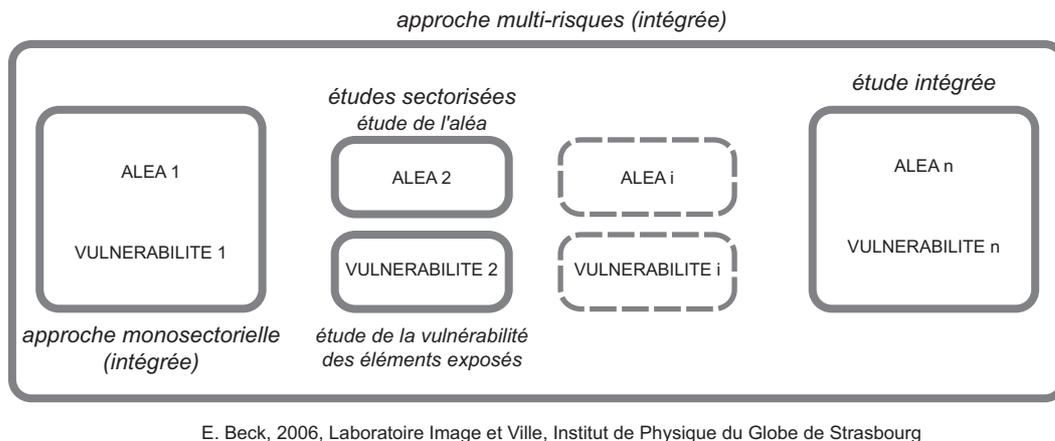


FIG. 1.7 – *Études mono-sectorielles, sectorisées, intégrées, multi-risques.*

1.2.2.3 Vers une intégration des approches multi-risques dans la gestion des risques

Ces différents exemples montrent que des interactions entre risques ont eu lieu dans un passé relativement proche et soulignent qu’une approche multi-risques d’évaluation des risques comme de leur gestion doit être envisagée.

En termes de gestion de crise, il est indispensable de considérer les risques de manière globale, non pas comme des boîtes noires indépendantes les unes des autres mais comme des systèmes pouvant interagir entre eux. En effet, on ne réagit pas de la même manière en termes de gestion des secours face à une inondation, un tremblement de terre ou une dispersion de produits chimiques; on ne gère pas une catastrophe naturelle de la même

manière qu'une catastrophe technologique : comment réagir alors si les deux se produisent quasi-simultanément ? Les simulations grandeur nature de catastrophes, mises en œuvre afin de tester l'efficacité et la coordination des moyens d'intervention, ne prennent généralement en compte qu'une catastrophe à la fois et n'envisagent pas de réactions en chaîne (exercice PPI autour de l'usine Rhodia en novembre 2004 - fig. 1.8 : accident industriel ; simulation d'un séisme à Wickerschwihr : commune du Haut-Rhin ayant fait l'objet d'un plan d'entraide générale et d'assistance aux secours - plan PEGAS ; Royet, 1998). Pourtant, il est important de se préparer à réagir face aux dommages causés par des phénomènes de nature différente car les moyens mis en œuvre ne sont pas les mêmes. Par ailleurs, il faut être prêt à réagir sur des sites différents, et pas uniquement se concentrer sur le site industriel où aura eu lieu l'explosion ou sur la digue qui aura cédé (par exemple).



FIG. 1.8 – *Exercice PPI autour de l'usine Rhodia, le 24 novembre 2004. Photographie : V. Wadel, SIDPC68. Exemple d'exercice grandeur nature ne prenant en compte qu'un seul type de risque (industriel).*

L'évolution de la législation française en matière de gestion des risques illustre fort bien la tendance qui se dégage (cf. § 1.1.5) : outre une volonté de simplification des plans par la diminution de leur nombre et par leur uniformisation, l'émergence des PPR multi-risques montre bien qu'il n'est plus possible de gérer les risques sans prendre en compte une éventuelle interaction entre eux.

Une réflexion similaire a été menée aux États-Unis par l'agence fédérale de gestion des urgences (Federal Emergency Management Agency, FEMA) dès 1995, suite aux catastrophes particulièrement destructrices et coûteuses qui ont touché le pays : le séisme de Loma Prieta et l'ouragan Hugo en 1989, l'ouragan Andrew en 1992, les inondations du Midwest en 1993 et 1995 et le séisme de Northridge en 1994 [FEMA, 1995, FEMA, 1997, *in* Cutter, 2000]. L'objectif était de caractériser l'ensemble des risques auxquels un territoire est exposé, en évaluant les risques à l'échelle de l'État (au sens administratif américain du terme), et de proposer des mesures de prévention visant à réduire les pertes humaines et matérielles tout en considérant que les mesures de prévention élaborées pour un risque étaient compatibles avec les mesures mises en place pour tous les autres risques. Il ne s'agit pas à proprement parler d'une vision multi-risques prenant en compte les interactions entre risques, mais c'est un premier pas.

L'évolution des approches (mono-sectorielle vers multi-risques) reflète également l'évolution actuelle des sciences, puisque l'on passe d'études souvent mono-disciplinaires des risques

à des études faisant appel à plusieurs disciplines simultanément, comme c'est le cas de ce travail de thèse. Ainsi, que ce soit dans la législation ou dans les travaux scientifiques, une prise en compte progressive des interactions entre risques semble se manifester.

1.3 Approche multi-risques en milieu urbain

1.3.1 La ville, un espace multi-risques

Comme nous l'avons défini précédemment, le risque est le résultat de la combinaison entre un aléa et des éléments vulnérables. L'étude d'un risque prend son sens lorsqu'on s'intéresse à ses deux composantes. La ville constitue donc un milieu où il est indispensable d'étudier les risques car elle est un lieu vulnérable et parce qu'elle est exposée à des aléas nombreux et variés.

1.3.1.1 La ville, lieu vulnérable

Les villes constituent des lieux vulnérables par définition : comme mentionné par J. Dubois-Maury et C. Chaline, "le fait de base fondamental réside dans l'accumulation d'hommes et d'activités, qui est le propre de la ville mais en induit la fragilité ²⁹" [Dubois-Maury et Chaline, 2002]. Selon Y. Veyret, "la ville est l'espace le plus vulnérable" [Veyret, 2004, p. 46] [Veyret, 2004, p. 46]. En effet, on y rencontre de nombreux éléments exposés. Tout d'abord, la ville concentre des effectifs de **population** élevés (de quelques milliers à quelques millions d'habitants), mais également des densités de population importantes qui accroissent la vulnérabilité de la population. Dans certains îlots, les densités peuvent atteindre plusieurs dizaines de milliers d'habitants au kilomètre carré, notamment dans les quartiers d'immeubles de grande hauteur. Dans la ville de Mulhouse, le quartier des Coteaux, un quartier de tours et de barres d'immeubles, est caractérisé par une densité de population égale à 27 450 hab./km². Ensuite, la ville est constituée de **bâtiments** de toutes tailles et de tous âges, les uns à côté des autres ou plus espacés, des maisons individuelles tout comme des hangars industriels. Il faut également porter une attention particulière au patrimoine historique et culturel. Les villes, souvent anciennes, sont des lieux de valeur historique importante. Elles constituent aussi des nœuds de **réseaux** (ferrés, routiers, fluviaux). Enfin, on y rencontre des **activités** humaines de toutes sortes, économiques, administratives, de loisirs, puisque les villes concentrent des centres décisionnels et des sièges sociaux de grandes entreprises, tout comme des complexes industriels importants. La vulnérabilité d'un espace urbain est également liée sa **taille** et son extension spatiale, qui lui confèrent une inertie la rendant encore plus vulnérable face à une catastrophe.

Non seulement la ville constitue un lieu vulnérable car elle concentre des éléments exposés nombreux et variés, mais cette vulnérabilité est en augmentation, notamment en raison d'une urbanisation croissante et de l'innovation technologique, qui entraîne une augmentation de la valeur vénale des biens. Selon une définition économique de la vulnérabilité, on peut considérer que plus la valeur des biens exposés est élevée, plus leur vulnérabilité est grande [André, 2004].

²⁹Derrière la notion de fragilité évoquée par J. Dubois-Maury et C. Chaline, nous retrouvons la notion de vulnérabilité.

L'augmentation de la vulnérabilité des villes liée à la transition urbaine

La vulnérabilité des villes augmente aussi en raison d'un accroissement du taux d'urbanisation. En 2004, 48 % de la population mondiale vivait dans les villes ³⁰. Ce chiffre pourrait atteindre les 60 % d'ici 2030. Bien sûr, cela accroît la population exposée aux aléas, mais cela augmente également les concentrations de population, et une population dense est toujours plus vulnérable qu'une population éparse (effet de groupe, inertie dans les déplacements, propagation de la panique au sein de groupes [Provitolo, 2002]). Ce phénomène d'accroissement de la population urbaine est particulièrement visible dans les pays les plus pauvres, comme l'indique le graphique suivant (fig. 1.9 ; [UN-DESA, 2004]). La ville, plus qu'un lieu multi-risques, est dans ces cas synonyme de modernité, de travail, de réussite. Pourtant, parmi les cent villes les plus peuplées, plus des trois quarts d'entre elles sont exposées à au moins un aléa naturel, et pas moins de 70 de ces villes sont susceptibles d'être touchées par un séisme de magnitude élevée une fois tous les cinquante ans [UNISDR, 2002].

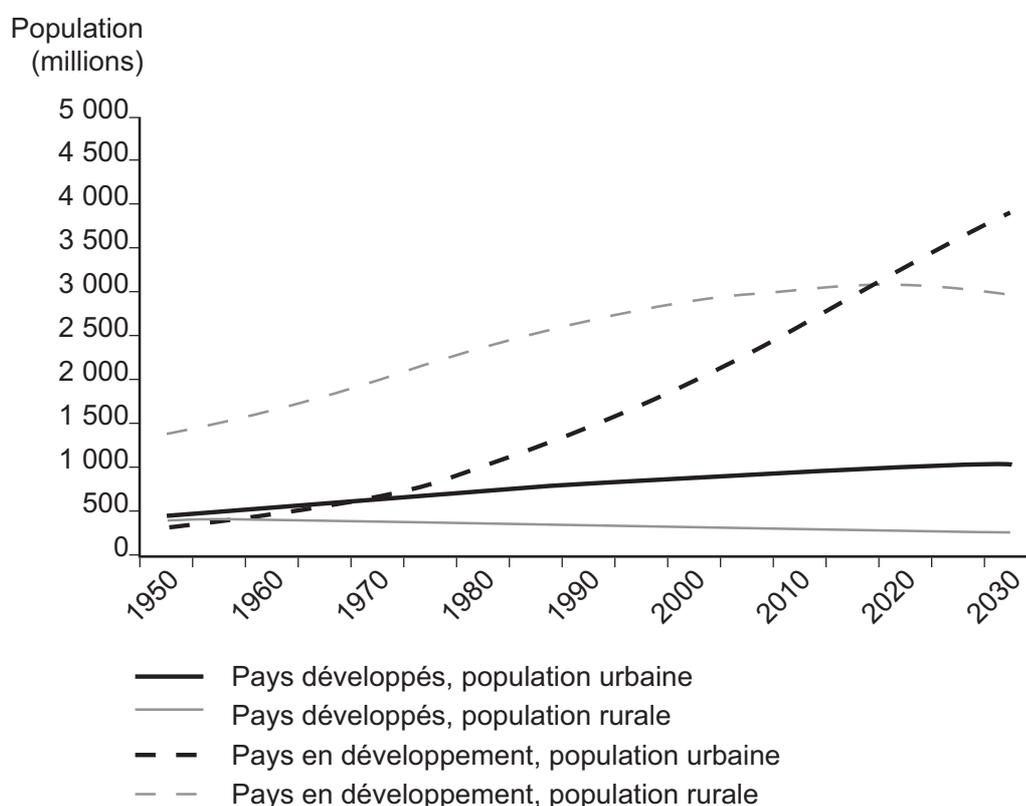


FIG. 1.9 – *Évolution des populations urbaine et rurale entre 1950 et 2030 (prévision) des pays développés et en voie de développement. D'après UN-DESA, 2004. La proportion de population urbaine pourrait atteindre les 60 % d'ici 2030. L'urbanisation touchera principalement les pays en voie de développement.*

Les risques dans les villes peuvent demeurer faibles tant que vulnérabilité et aléa ne se croisent pas, ne sont pas en co-présence. Cependant, le processus d'urbanisation ne tient pas toujours compte de ce paramètre. L'urbanisation spontanée et les habitats précaires

³⁰Source : UN-FPA, United Nations Fund for Population Activities, 2004 "State of the world population 2004".

agrippés aux pentes instables d'Amérique Centrale ne sont qu'un exemple parmi d'autres. L'accident de l'usine AZF de Toulouse en 2001 illustre également le problème du rapprochement entre zones dangereuses et éléments vulnérables, sous l'impulsion de l'urbanisation, puisque de nombreuses usines dangereuses comme celle appartenant à l'Office National Industriel de l'Azote (ONIA), devenant plus tard AZF [Centre Interdisciplinaire d'Etudes Urbaines, 2002], se trouvaient initialement en dehors des agglomérations et loin des zones habitées. Les seules habitations que l'on pouvait rencontrer à proximité étaient les maisons d'ouvriers travaillant dans lesdites usines (ex. : ouvriers indiens de l'usine Union Carbide, à Bhopal). Et pourtant, à la faveur d'une absence de réglementation, d'un laxisme des pouvoirs publics et face à une pression démographique toujours plus forte, les villes se sont développées et les espaces urbanisés ont rattrapé les usines jusqu'alors mises à l'écart (fig. 1.10). Il est donc difficile de ne blâmer que les industriels et de les accuser de s'être installés volontairement en pleine ville. Les autorités ayant délivré des permis de construire peuvent davantage être mises en cause.



FIG. 1.10 – *Quartier résidentiel avoisinant l'usine Rhodia-Dornach, à Mulhouse (Haut-Rhin), établissement classé "Seveso seuil haut". E. Beck, 2004. Cette proximité illustre le problème des sites industriels dangereux, localisés à l'origine à l'extérieur des villes et rattrapés par l'urbanisation.*

L'innovation technologique à l'origine d'un coût des catastrophes en nette croissance

La vulnérabilité des espaces anthropisés, et notamment des villes, augmente, puisque leur valeur économique est en progression. La vulnérabilité est accrue par la valeur vénale des infrastructures, produits, objets, liée à leur niveau de technologie qui augmente avec la diffusion technologique et les innovations. Ainsi, les catastrophes coûtent toujours plus cher, comme le montre la base de données du CRED (base de données internationale des catastrophes : EM-DAT, produite par l'OFDA et le CRED ³¹ (fig. 1.11 ³²).

³¹Dans la base de données EM-DAT, les catastrophes sont comptabilisées par pays. Si une catastrophe touche deux pays, elle sera comptabilisée deux fois. Par ailleurs, une catastrophe est comptabilisée dans la base si elle répond à au moins un des quatre critères suivants : 10 personnes tuées ou plus ; 100 personnes affectées ; déclaration d'état d'urgence ; appel à l'aide internationale. Selon cette base de données, une catastrophe peut être d'origine naturelle ou anthropique. On peut citer notamment les guerres, explosions, épidémies, sécheresses, séismes, incendies, inondations, accidents de transport, éruptions volcaniques, ouragans, accidents nucléaires ou de transport de matières dangereuses, etc. Il s'agit avant tout d'un événement

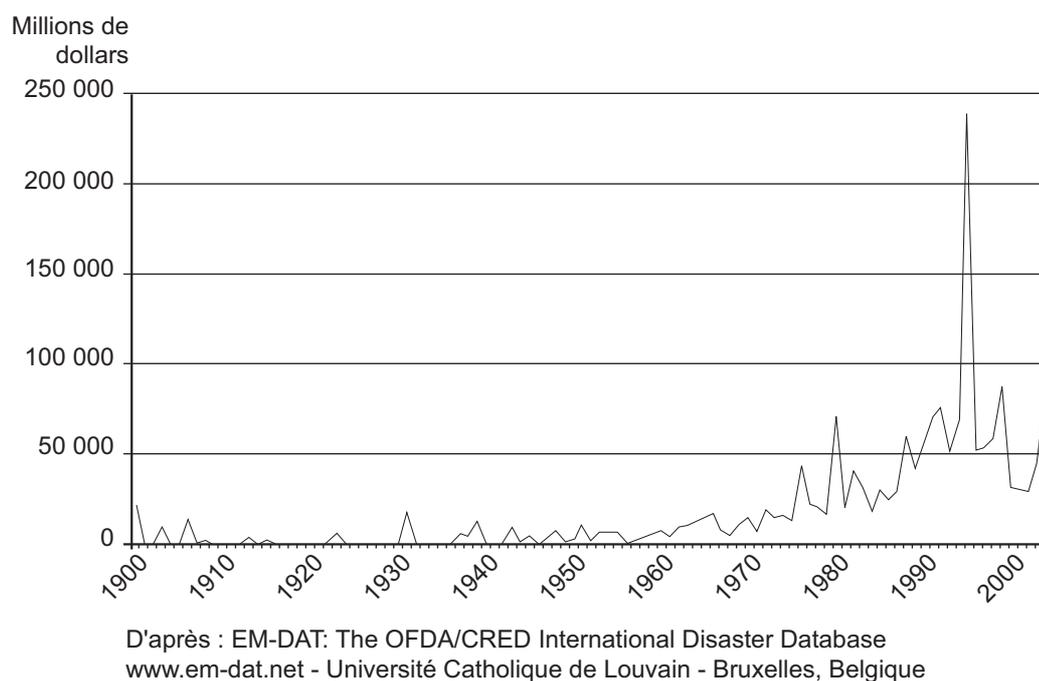


FIG. 1.11 – Coût généré par les catastrophes (toutes confondues) par an entre 1900 et 2005. D'après EM-DAT, 2006. Le maximum atteint en 1995 correspond au séisme de Kobé (Japon) et aux inondations du Midwest (États-Unis).

1.3.1.2 La ville, exposée à des aléas divers

Des menaces d'origine naturelle, inhérentes au contexte dans lequel les villes se sont établies

Les villes sont exposées à des aléas de nature diverse. Dans certaines régions, des menaces inhérentes au milieu naturel dans lequel ces villes se sont établies augmentent les risques : les pentes du Misti, sur lesquelles s'étend la ville d'Arequipa (Pérou), ou les versants du Vésuve, où les Napolitains se sont installés depuis longtemps ; un contexte tectonique favorable à l'occurrence de séismes de magnitude élevée (San Francisco, Kobé, Bam...), les rives inondables d'un cours d'eau (Niamey, Oder, Danube...). Et pourtant, la menace est bien réelle, puisque les villes ont d'ores et déjà été touchées par des catastrophes dans le passé (éruption du Vésuve ayant détruit Pompéi en 79 ap. J.-C., tremblement de terre de Bâle en 1356 ou de Lisbonne en 1755). D'après J. Dubois-Maury et C. Chaline, 180 catastrophes urbaines se produisent chaque année depuis les années 1970 (les accidents de transport ne sont pas pris en compte) et, parmi celles-ci, 66 % sont d'origine naturelle, avec en premier lieu les inondations, les ouragans et les séismes [Dubois-Maury et Chaline, 2002].

soudain et imprévisible qui cause de nombreux dommages et victimes.

³²Le maximum atteint en 1995 correspond au séisme de Kobé (Japon) et aux inondations du Midwest (États-Unis). Cependant, cette courbe ne prend pas en compte le tsunami de fin 2004 ni les ouragans Katrina, Rita et Wilma ayant touché la Floride en 2005.

Des menaces d'origine anthropique, nées de l'évolution et de la croissance des villes

La ville concentre des activités anthropiques. Parmi celles-ci, certaines, industrielles ou liées à la production d'énergie, peuvent s'avérer dangereuses pour les populations avoisnantes, les bâtiments et l'environnement naturel. De la rencontre et de l'association entre les hommes et la dangerosité de leurs activités naissent les risques technologiques. Les activités anthropiques présentant une menace ne sont pas un phénomène récent puisque, comme nous l'avons vu précédemment, l'apparition du risque industriel coïncide avec la Révolution Industrielle et avec le développement d'activités liées au transport ferroviaire (explosions de chaudières, déraillements dégénérant en incendies...), à l'activité minière (coups de grisou) et à l'utilisation de produits chimiques. En fait, c'est surtout la dangerosité et l'ampleur des accidents qui se sont accrues car, à partir du moment où l'homme a utilisé le feu et la poudre, on peut considérer que des activités anthropiques dangereuses existaient déjà. Pour mémoire, l'explosion de la poudrière de Grenelle à Paris, en 1794, a fait 1 000 victimes et est, depuis, considérée comme la première catastrophe technologique en France. Les catastrophes en ville se sont multipliées au fil du temps (fig. 1.12).

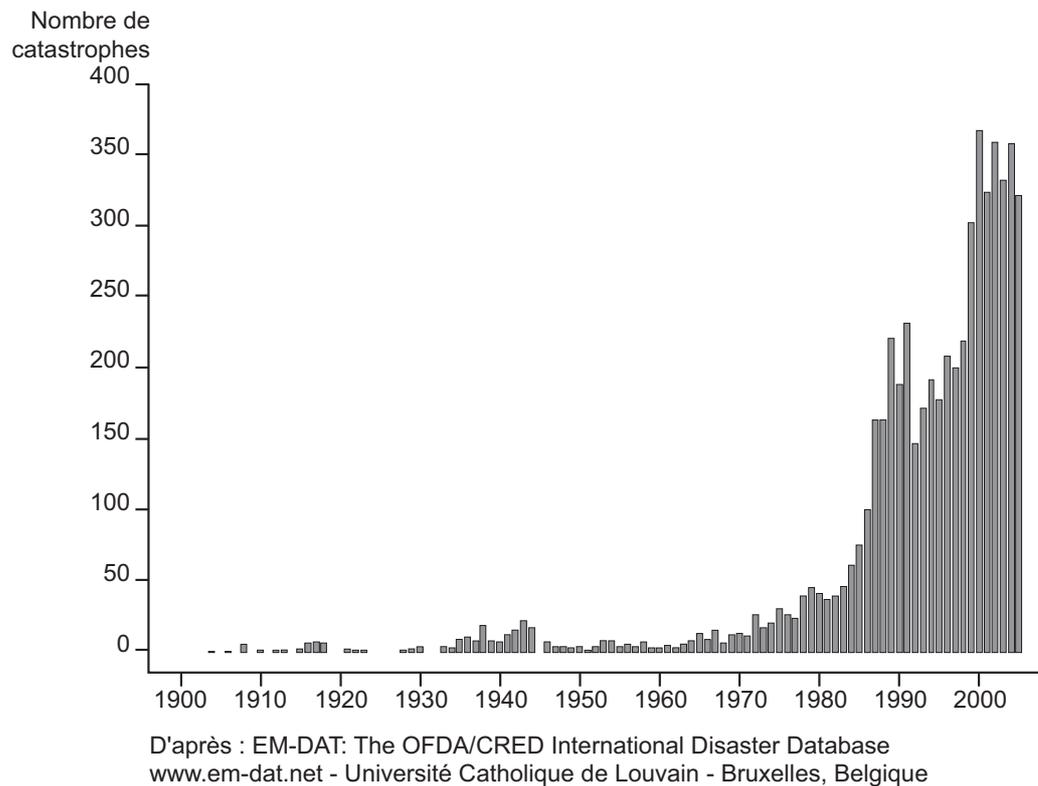


FIG. 1.12 – Nombre de catastrophes industrielles par an entre 1900 et 2005. D'après EM-DAT, 2006. Le nombre de catastrophes industrielles est en augmentation exponentielle depuis les années 1970.

Le changement du système productif à l'origine de l'apparition de nouveaux risques : l'exemple du transport de matières dangereuses

Avec l'évolution des villes et du système de production sont également apparus de nouveaux risques, dus au progrès et aux révolutions industrielles. Citons l'exemple du transport de matières dangereuses (TMD).

Autrefois, lorsqu'un objet quelconque, comme un tube de dentifrice, était fabriqué, les étapes nécessaires à sa fabrication étaient réalisées sur un même site, de la fabrication du tube en plastique souple à la production de la pâte de dentifrice et en passant par celle du bouchon en plastique dur. Puis le système de production a évolué, la chaîne d'élaboration du tube de dentifrice a été segmentée en plusieurs étapes intermédiaires, désormais effectuées sur des sites différents : une usine s'est alors spécialisée dans la fabrication du tube et du bouchon, une autre dans la synthèse des composants primaires nécessaires à l'obtention de la pâte, une autre dans l'élaboration de la pâte finale, etc. Les différentes usines étant distantes les unes des autres, il a fallu mettre en place des moyens permettant d'acheminer les composants primaires vers l'usine d'élaboration de la pâte finale, etc. C'est ainsi que s'est fortement développé le transport routier, ferré et par bateau de matières premières, de composants secondaires, pour aboutir au produit final. Outre l'augmentation du trafic routier de poids lourds, un autre risque est apparu, celui du TMD, puisque les produits transportés ne sont pas tous sans danger. Il a toujours été question d'acheminer la matière première. Mais on assiste de plus en plus à une modification du système productif, à une sectorisation des procédés industriels, alors que certaines opérations pourraient être concentrées en un même site. Le développement du risque de transport de matières dangereuses est également dû au contexte économique et à la mondialisation, qui génèrent une multiplication des échanges.

Par ailleurs, les entreprises qui utilisent ou produisent des substances toxiques et qui sont ainsi soumises à une réglementation sont actuellement contraintes de réduire la quantité de ces substances stockées sur leur site. L'objectif visé ici par la législation est de diminuer le risque en réduisant l'aléa. Les entreprises sont alors forcées de fonctionner en flux tendu, également dans un objectif de diminution des coûts de revient. La solution qui s'offre à elles consiste à augmenter les déplacements de ces produits, de manière à s'adapter à la demande et aux besoins, sans pour autant augmenter la quantité de substances toxiques stockées. Le TMD est alors accru, et on assiste à un transfert d'un risque localisé (le risque "site" [Glatron, 1997]) vers un risque délocalisé puisque mobile, et dont les axes de transport réellement empruntés sont difficiles à identifier. Ceci se traduit également par le transfert d'un secteur réglementé au niveau national (réglementation sur les installations classées pour la protection de l'environnement - ICPE -, loi du 19/07/1976) et au niveau européen (directives Seveso 1 et 2, 1990 et 1996) vers un secteur moins bien maîtrisé, bien que réglementé (règlement ADR du 5/12/1996 transcrit par l'arrêté français du 1/07/01 ; loi du 30 juillet 2003), celui du transport. Notons enfin que seule l'implantation de canalisations peut imposer des contraintes d'occupation des sols, ce qui n'est pas le cas pour les tronçons de voies routières, ferroviaires ou fluviales par lesquelles transitent des matières dangereuses. De même, il n'existe pas de signal d'alerte spécifique à un accident de TMD.

Dès lors, les villes peuvent bien souvent être qualifiées de multi-risques, parce qu'elles sont exposées à des aléas de nature différente. Pour autant, peut-on affirmer que les villes sont le lieu d'interactions entre ces aléas ? Ce n'est pas toujours le cas, car certains aléas sont indépendants les uns des autres : par exemple, une tempête et un séisme n'auront pas de relation directe de cause à effet (sauf si le séisme entraîne la rupture d'un barrage), ce qui pourra être le cas pour d'autres aléas.

Au final, les villes, espaces vulnérables, font l'objet d'une concentration particulière d'aléas de nature différente, naturelle ou anthropique. Nous allons voir à présent pour quelles raisons il est important d'étudier les risques en milieu urbain.

1.3.2 La nécessité d'étudier les risques en milieu urbain

Il est d'autant plus important d'étudier les risques en milieu urbain que l'on observe une augmentation du nombre de catastrophes naturelles auxquelles elles sont exposées et, dans certains cas, une absence de mémoire et de culture des risques.

1.3.2.1 L'augmentation du nombre de catastrophes naturelles ?

D'après le graphique 1.13, les catastrophes naturelles sont en augmentation et s'amplifient (notamment les phénomènes d'origine atmosphérique, en relation avec le réchauffement climatique global). Le changement de climat a un impact sur l'aggravation des catastrophes [Fowler et Hennessy, 1995 ; UNISDR, 2002]. On peut citer par exemple une augmentation du nombre d'événements de précipitations intenses, qui est à l'origine d'inondations, avalanches, mouvements de terrain, coulées boueuses, laves torrentielles, etc., plus fréquents ou, à l'opposé, des périodes de sécheresse répétées, à l'origine d'un risque d'incendie plus élevé, sans parler des dommages liés aux phénomènes d'alternance de dessiccation/humectation des sols, des pertes de récoltes, des pertes en sol (érosion).

Outre le réchauffement global lié à l'activité anthropique, d'autres activités humaines sont directement responsables de l'aggravation des catastrophes naturelles. Par exemple, en ce qui concerne les inondations et les coulées boueuses, deux autres causes peuvent être identifiées :

- l'imperméabilisation des sols en milieu urbain (avec la multiplication des surfaces bitumées) et en milieu rural ou forestier (due à la déforestation, aux défrichements intensifs, aux pratiques culturales et à la mécanisation - suppression des haies, monoculture du maïs : l'érosion en est accrue et on note une augmentation de l'imperméabilité en raison de la présence de croûtes de battance) : l'eau ne peut plus s'infiltrer, elle s'écoule ;
- la construction d'ouvrages d'art peu adaptés (souvent sous-dimensionnés) pour canaliser des cours d'eau et l'urbanisation dans les champs naturels d'expansion de crue, pourtant nécessaires à la réalisation "normale" d'une crue : les populations, qui se sentaient protégées, sont exposées et atteintes par les effets des inondations.

Ces chiffres doivent cependant être considérés avec une certaine précaution. L'augmentation du nombre de catastrophes recensées par le CRED (fig. 1.12 et 1.13) est due d'une part à une croissance objective du nombre d'événements destructeurs, d'autre part à une sensibilisation accrue. En effet, on note une augmentation des préoccupations en terme de risques, liée aux exigences de plus en plus forte de la population, notamment dans les pays développés, qui réclame une sécurité exemplaire et une transparence dans ce domaine (communication de la moindre alerte). Cela signifie que les autorités et acteurs en charge de l'étude et de la gestion des risques se doivent de répertorier chaque incident, chaque catastrophe, et d'en faire une autopsie pour en connaître les moindres détails et remplir leur rôle d'informateur de la population. Ils doivent également se prémunir de tout dépôt de plainte pour n'avoir pas prévu qu'une catastrophe allait se produire, d'où une utilisation parfois abusive du principe de précaution. Par ailleurs, la montée en puissance de la

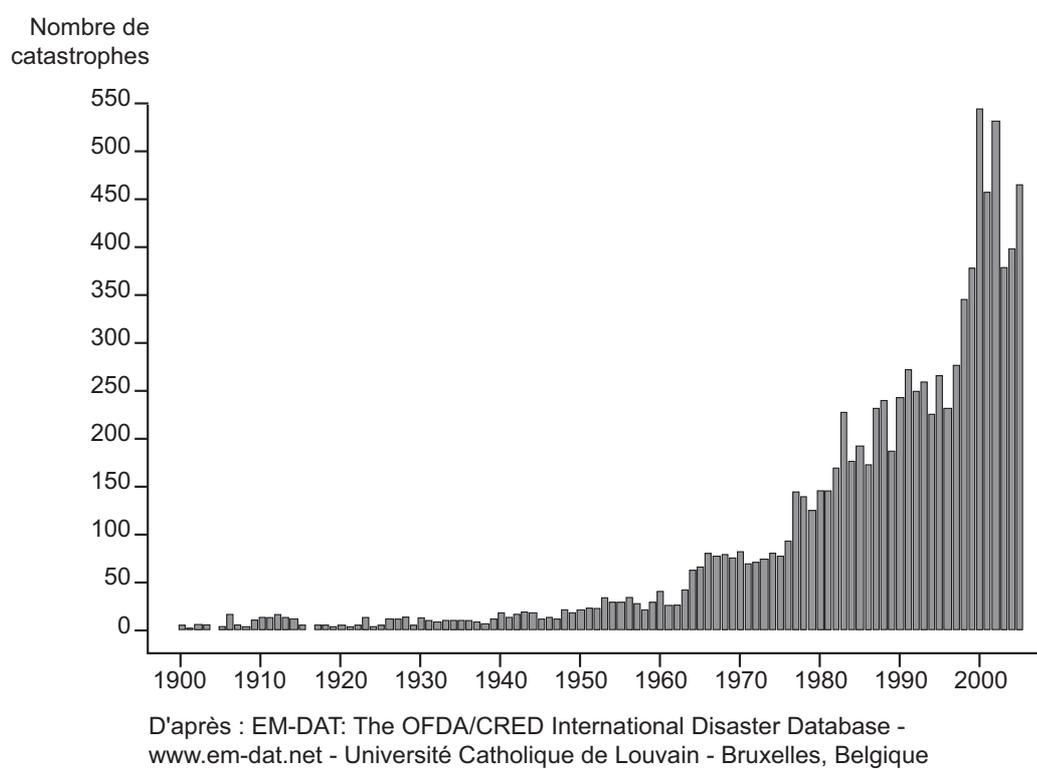


FIG. 1.13 – Nombre de catastrophes naturelles par an entre 1900 et 2004. D'après EM-DAT, 2006. Le nombre de catastrophes naturelles est en nette progression, mais cette augmentation n'est pas complètement objective (sensibilisation accrue de la société...).

société de l'information portant sur l'actualité en général et sur les catastrophes en particulier (mais moins des risques, des menaces potentielles et latentes) pousse à une meilleure connaissance des phénomènes mais également à une banalisation de cette information. Enfin, le perfectionnement des techniques de surveillance (satellites, télécommunications, informatique. . .) favorise le recensement de ces événements et la gestion de leur mémoire. Ainsi, l'augmentation importante du nombre de catastrophes, naturelles (notamment climatiques) et technologiques, serait due au réchauffement global du climat mais également à une médiatisation et une sensibilisation exacerbées des événements catastrophiques.

1.3.2.2 L'absence de culture et de mémoire des risques

La vulnérabilité des populations des villes est accrue par une culture du risque peu présente et par la méconnaissance de certains risques (parce que peu médiatisés voire peu maîtrisés). L'exemple du risque TMD dans la région de Mulhouse est assez significatif. Une enquête menée en 2004 a permis de confirmer l'hypothèse que certains risques sont méconnus [Beck *et al.*, 2004]. Le territoire communal mulhousien est sillonné par plus d'une quarantaine de kilomètres de routes, de voies ferrées ou navigables sur lesquelles transitent des convois de substances toxiques. Et pourtant, à la question "quels sont les risques, les nuisances, les dangers auxquels vous vous sentez exposé ici, à votre domicile ?", sur les 125 individus interrogés, pas une personne n'a cité le TMD, alors que le risque est bien réel.

La vulnérabilité des populations urbaines est accentuée par la perte de la mémoire des catastrophes, liée notamment à la perte de la tradition orale, comme le souligne B. Martin [Martin, 2004]. O. Dollfus et R. D'Ercole affirment d'ailleurs que "la catastrophe est (...) souvent le fruit de l'oubli et de la négligence" [Dollfus et D'Ercole, 1996]. Cela est aussi lié à la nature inhérente d'une catastrophe, qui reste (heureusement) exceptionnelle [Favier et Granet-Abisset (dir.), 2000]. Cet effet se fait particulièrement ressentir pour les catastrophes dont la période de retour est supérieure à une vie humaine. Malgré une médiatisation accrue des événements catastrophiques, leur transmission orale n'est plus assurée dans la plupart des pays développés. Dans les pays de tradition orale, ce constat n'est pas encore vérifié (cf. *infra*, exemple des habitants de l'île de Simeulue face au tsunami de fin 2004). En France, par contre, "il suffit de consulter les archives pour trouver de nombreux précédents aux crues spectaculaires de l'Ouvèze à Vaison-la-Romaine en 1992 (21 inondations recensées depuis 1433 [Bourrelier *et al.*, 2000]) ou des cadereaux³³ de la ville de Nîmes en 1988 (38 phénomènes ayant donné lieu à des inondations depuis 1334, le dernier en . . . 1977" : dans ce dernier cas, la période de retour de l'inondation est inférieure à une vie humaine. Ceci est d'autant plus inquiétant que la mémoire des catastrophes est une des bases de la prévention et qu'elle participe activement à la construction d'une culture des risques [Dollfus et D'Ercole, 1996].

Lorsqu'une mémoire des risques existe, les mesures de protection contre les effets d'une catastrophe ne sont pas pour autant appliquées, pour des raisons politiques ou économiques (par exemple, construire une maison aux normes parasismiques entraîne un sur-coût pouvant aller jusqu'à 5 %).

En conclusion, les villes constituent bien des lieux multi-risques dont il est important de se préoccuper, en raison de l'augmentation du nombre de catastrophes naturelles, qui rendent les villes plus menacées, et en raison de l'absence de culture et de mémoire des risques.

³³Cadereau : cours d'eau temporaire dont le niveau peut monter rapidement.

1.3.3 Étudier les risques à l'échelle infra-communale

Étudier les risques en milieu urbain, mais à quelle échelle ? Doit-on se contenter d'une information à l'échelle communale voire cantonale ? La problématique multi-risques introduit ici le problème des différences d'échelle. Concernant la prévention des risques, la législation française n'aborde pas les risques à la même échelle. Il est par exemple conseillé d'étudier le risque inondation ou coulées boueuses à l'échelle du bassin versant, le risque mouvements de terrain à l'échelle du bassin de risque ³⁴, le risque industriel à l'échelle du site dangereux, et le risque sismique est géré à l'échelle cantonale ³⁵. Cela est notamment lié à l'échelle spatiale d'une catastrophe, selon le phénomène considéré. En effet, l'extension spatiale d'une catastrophe n'est pas la même selon la nature du phénomène. Par exemple, un séisme pourra avoir des conséquences à une échelle régionale voire supra-régionale, alors que les effets directs d'un mouvement de terrain seront beaucoup plus localisés.

Comment procéder lorsque l'on est amené à étudier les différents risques auxquels une commune (ou une agglomération) est exposée ? Peut-on tenir compte des différences d'échelle simultanément pour identifier les risques multiples ?

Dans le cas des risques technologiques, plutôt que de considérer chaque site comme indépendant des autres, on peut déjà l'analyser à l'échelle de l'agglomération, en prenant en compte d'éventuels effets cumulatifs en termes d'exposition au risque ou des effets dominos dans le cas d'une catastrophe. Cet effet cumulatif peut également intervenir au sein d'un même site, si plusieurs scénarios sont considérés par l'étude de danger³⁶.

Dans le cas du risque sismique, pris en compte actuellement à l'échelle du canton, il est nécessaire d'aboutir à une connaissance plus précise à l'échelle infra-communale. Cela implique qu'un paramètre pourrait influencer les effets d'un séisme à une échelle locale et qu'il faudrait en tenir compte dans l'évaluation des risques et dans les normes de construction parasismique. Cet aspect sera davantage développé dans le deuxième chapitre.

Cependant, étudier les risques à l'échelle macroscopique conduit à poser un certain nombre d'hypothèses visant à généraliser des phénomènes, qui pourraient être étudiés à une échelle microscopique. Étudier les risques à l'échelle de l'agglomération permet d'avoir une vision générale, parfois simple mais pas pour autant simpliste, de la réalité.

³⁴Bassin de risque : entité géographique homogène soumise à un même phénomène.

³⁵Suivant la réglementation en vigueur. Cependant, la révision du zonage sismique français, actuellement en cours, devrait aboutir à un zonage appliqué à l'échelle de la commune.

³⁶Etude de danger : étude élaborée par un exploitant, décrivant en détails les installations de l'établissement en vue d'identifier précisément les risques internes et externes à l'établissement, de les évaluer par des scénarios d'accidents envisageables, de concevoir les mesures à même de les réduire et de recenser les moyens de secours disponibles en cas de sinistre (source : DRIRE. www.drivre.gouv.fr).

1.4 Problématique générale

Cette première analyse permet de mettre en avant la nécessité d'étudier les risques en milieu urbain et d'adopter, dans le cadre de cette étude, une démarche intégrée multi-risques.

1.4.1 La connaissance au service de la gestion : mise en place de la problématique

Les risques ne peuvent plus être considérés indépendamment les uns des autres puisque des interactions sont possibles. En milieu urbain, les interactions entre risques peuvent être nombreuses et la complexité de leur gestion d'autant plus accrue. Face à ce constat, plusieurs questions se posent : comment identifier les risques ? Comment les estimer ? Quelles sont les interactions entre risques ? Comment les représenter ? Comment tenir compte de ces interactions dans l'évaluation des risques à l'échelle infra-communale ? Comment évaluer les conséquences d'une catastrophe en chaîne sur un système social ? Ce travail de thèse a donc pour problématique l'étude des interactions entre différents risques en milieu urbain, avec application à une agglomération européenne de taille moyenne, Mulhouse.

Dans le cadre de cette étude, seuls les risques sismique et technologiques seront pris en compte, bien que la méthodologie puisse être appliquée à d'autres types de risques. Comme nous l'avons défini précédemment, les risques technologiques regroupent les risques nucléaire, de rupture de barrage, industriels et de transport de matières dangereuses. Dans le cadre de ce travail, nous n'avons considéré que le risque industriel et une partie du risque de transports de matières dangereuses de la zone d'étude. Ce risque est dû à la présence d'une gare de triage faisant l'objet d'un PPI. Les axes de TMD ne sont donc pas considérés ici.

La problématique est précisée ainsi : il s'agit tout d'abord d'étudier les processus (risques sismique et technologiques), à l'échelle infra-communale ; puis d'identifier les interactions entre ces risques et les éventuelles réactions en chaîne ; et, enfin, de proposer un support d'aide à la décision pour la prévention des risques.

Il s'agit aussi de développer une méthodologie intégrée et multi-risques d'étude des risques en milieu urbain et à l'échelle infra-communale. Dans ce contexte, nous nous attacherons à vérifier l'hypothèse que nous soutenons, selon laquelle **des réactions en chaîne peuvent être observées entre risque sismique et risques technologiques dans la région d'étude, l'agglomération de Mulhouse.**

1.4.2 Objectifs

Les objectifs de cette recherche se déclinent ainsi en deux temps.

Le premier objectif consiste à acquérir une meilleure connaissance des risques sismique et technologiques dans l'agglomération, indépendamment les uns des autres d'abord, ce qui nécessite la localisation et la caractérisation des risques. Une éventuelle interaction entre les risques est ensuite étudiée par l'intermédiaire d'un scénario sismique [Winckell *et al.*, 2000]. Dans le contexte actuel de l'étude, seul l'aspect aléa naturel (à savoir le séisme) à l'origine de catastrophes technologiques est considéré et non l'inverse.

Évaluer les risques signifie caractériser les différentes composantes du risque, à savoir les aléas et les vulnérabilités des éléments exposés. Évaluer le risque sismique impose de connaître l'accélération potentielle à laquelle un bâtiment peut être assujéti. Dans notre cas, l'objectif est de caractériser les aléas sismique et technologique, ainsi que la vulnérabilité des bâtiments, des activités qu'ils accueillent et de la population face à ces deux aléas.

Le second objectif de l'étude consiste à mettre en place un outil d'aide à la décision par l'intermédiaire d'un système d'information géographique (SIG) dédié, qui constitue un outil performant en matière d'étude des risques (ISTED, 2005, Sauvargnargues-Lesage, 2001 ; cf. § 2.6.2). L'ensemble des données issues de la reconnaissance des risques et de la simulation d'une catastrophe seront intégrées dans ce SIG. Ce SIG multi-risques aura ainsi pour vocation de fournir aux autorités en charge de la gestion des risques des informations sur les aléas, les éléments exposés, les risques, les interactions entre ces risques et de les accompagner dans leurs démarches de prévention des risques par l'aménagement, la préparation de la gestion d'une crise et/ou l'information à la population.

1.5 Conclusion du premier chapitre

En définitive, l'étude des risques en milieu urbain selon une démarche intégrée et multi-risques apparaît comme une priorité, étant donné l'évolution croissante du nombre de catastrophes auxquelles sont soumises les villes en raison d'un certain nombre de facteurs pour partie naturels (réchauffement global) mais dans la majorité d'origine anthropique (déforestation, urbanisation, activités industrielles dangereuses...).

Dans ce contexte, nous proposons de développer une méthodologie d'étude des interactions entre deux types de risques différents, les risques sismique et technologiques. En effet, les travaux portant sur les interactions entre système naturel et système social sont encore trop peu répandus. L'objectif de ce travail de thèse est double : d'une part acquérir une meilleure connaissance des risques dans la zone d'étude (Mulhouse) ; d'autre part mettre en place un outil d'aide à la décision destiné aux autorités en charge de la prévention des risques. L'évaluation des risques sera effectuée à l'échelle infra-communale, intégrera les deux composantes (aléa et vulnérabilité) des deux risques et sera suivie d'une simulation de séisme, afin d'identifier d'éventuelles réactions en chaîne sur les sites technologiques dangereux. Nous chercherons à valider l'hypothèse selon laquelle des interactions entre risques sismique et technologiques sont observées dans la région de Mulhouse.

Chapitre 2

Démarche pluridisciplinaire d'étude des interactions entre risques sismique et technologiques

On l'a vu dans le premier chapitre, les risques ne peuvent plus être abordés dans une logique mono-sectorielle. Au contraire, il est indispensable de prendre en compte leurs éventuelles interactions et identifier les réactions en chaîne que peut produire une catastrophe, étant donné les complications qui peuvent apparaître en termes de gestion de crise. Nous nous concentrerons ici sur deux risques différents, l'un naturel, l'autre anthropique, même si cette méthode peut être appliquée à des cas de figure intégrant davantage de risques. Puisqu'il s'agit bien de risques, et non pas seulement d'aléas, la vulnérabilité des éléments exposés est également étudiée. La démarche intégrée présentée ici prend en compte l'intégralité de la chaîne d'étude des risques, du phénomène redouté (aléa) aux éléments qui y sont exposés (vulnérabilité), et y intègre également la dimension sociale par le biais de la représentation cognitive des risques. Dans un second temps, l'analyse des interactions par la mise en place du scénario est proposée. L'objectif est double : 1/ améliorer nos connaissances sur les risques : le risque sismique régional, l'aléa technologique et la vulnérabilité des éléments exposés ; 2/ simuler les effets d'un séisme important sur une agglomération et ses industries dangereuses localisées *in situ*.

Une telle étude pluri-sectorielle des risques nécessite une démarche pluridisciplinaire, qui intègre des approches, des méthodes et des outils développés dans les domaines des sciences de la terre et des sciences humaines sur une thématique commune, celle des risques. Les objets étudiés sont distincts mais nécessitent des approches méthodologiques partageables, comme c'est le cas de la mesure (instrumentale, collecte de données par l'enquête...). L'intégration de données hétérogènes dans un SIG nécessite une réflexion sur leur qualité, leur structuration voire des traitements pour les homogénéiser. Enfin, nous développerons les avantages du SIG pour l'étude des risques et plus particulièrement pour l'aide à la décision.

2.1 Évaluation du risque sismique à l'échelle infra-communale

Si l'on se réfère à la définition vue dans le premier chapitre, le risque sismique est le résultat de la combinaison entre un aléa et des éléments vulnérables. Ainsi, pour évaluer le risque sismique, il est nécessaire de caractériser l'aléa et la vulnérabilité des éléments qui y sont exposés.

Dans le cadre de cette étude, nous allons principalement nous intéresser aux variations spatiales des effets d'un séisme et nous ne procéderons pas à l'évaluation de l'aléa sismique. Cependant, quelques définitions sont nécessaires.

2.1.1 Évaluation de l'aléa sismique

L'aléa sismique correspond à la possibilité pour une région donnée d'être soumise à un séisme de caractéristiques définies (localisation ou **site** d'occurrence, **date** et **taille**) ou à la probabilité dans une période donnée qu'un seuil de magnitude ou d'accélération du sol soit dépassé. L'aléa sismique peut être étudié à plusieurs échelles, notamment locales ou régionales.

Le **site** potentiel d'occurrence d'un séisme peut être connu par l'intermédiaire de l'étude des failles actives, de leur localisation, leur segmentation et leurs dimensions, dont dépend leur potentiel à générer des secousses plus ou moins fortes. Toutefois, l'ensemble des accidents tectoniques ne sont pas identifiés. Les réseaux de surveillance sismique permanents permettent de connaître la sismicité instrumentale ¹ et de localiser avec précision les épicentres des tremblements de terre qui se produisent ; cependant, la connaissance de cette sismicité instrumentale est un outil essentiel mais non suffisant à la cartographie des failles actives.

Il n'existe pas actuellement de méthode permettant de prédire la **date** d'occurrence d'un séisme. Les différentes tentatives ont toutes montré des défauts majeurs, même si des signaux précurseurs de différentes natures sont parfois identifiés.

La **taille** (ou puissance) d'un séisme dépend avant tout de la longueur de la faille. Trois paramètres permettent de décrire la taille d'un tremblement de terre :

- L'**intensité macrosismique**, notée I, dont les valeurs entières en chiffres romains s'échelonnent de I à XII, est déterminée en fonction des dommages engendrés par le(s) séisme(s). On estime les valeurs d'intensité de séismes historiques à partir d'archives et l'intensité des séismes contemporains à partir d'observations de terrain (localisation des bâtiments ayant le plus souffert...) et d'enquêtes macrosismiques. L'échelle d'intensité utilisée en France depuis 2000 est l'échelle européenne EMS 98 ² (cf. annexe 3). Les

¹La sismicité instrumentale correspond aux séismes "modernes" qui ont été et sont toujours enregistrés par les instruments de mesure (sismomètres et accéléromètres) des réseaux de surveillance permanents depuis les années 1980 (pour la France), date de la création du RéNaSS (Réseau National de Surveillance Sismique, basé à Strasbourg à l'École et Observatoire des Sciences de la Terre - EOST : <http://renass.u-strasbg.fr>).

²Auparavant, c'est l'échelle MSK (élaborée par Medvedev, Sponheuer et Karnik en 1964) qui était utilisée.

- séismes anciens (sismicité historique ³) sont généralement décrits par une valeur d'intensité car les informations les concernant relèvent de descriptions des effets du séisme ;
- La **magnitude**, notée M , représente l'énergie dégagée au foyer. Ses valeurs s'écrivent en chiffres arabes sur une échelle ouverte (le maximum connu aujourd'hui correspond au séisme du Chili, en 1960, avec M_W ⁴ = 9.5). Elle est calculée par différentes méthodes à partir des enregistrements de tremblements de terre par les instruments des réseaux de surveillance ;
 - Le **moment sismique** est une autre grandeur physique permettant de caractériser la taille d'un séisme. Il est plus spécifiquement utilisé pour les séismes de magnitude élevée, pour lequel les magnitudes M_L ⁵, m_B ⁶ ou M_S ⁷ saturent (elles n'augmentent plus, bien que l'énergie du séisme, elle, continue à croître). Le moment sismique est calculé à partir du spectre des enregistrements des ondes sismiques par les capteurs large bande, alors que la magnitude est déterminée à partir des sismogrammes. Aujourd'hui, il devient possible de calculer le moment sismique même pour des événements faibles (jusqu'à $M \simeq 4$).

La caractérisation de la puissance d'un séisme susceptible de se produire dans une région donnée nécessite le recours à deux approches différentes mais complémentaires, l'une probabiliste et l'autre déterministe. La première consiste à déterminer la probabilité, au cours d'une période donnée, qu'un niveau d'intensité donné (ou qu'une valeur d'accélération donnée) soit atteint ou dépassé. La seconde est basée sur la description des mouvements du sol attendus au cours d'un séisme. Si cette évaluation théorique et/ou expérimentale ne peut être accomplie, la méthode déterministe devient davantage empirique et consiste à déterminer le niveau maximal de magnitude qui puisse être atteint dans un contexte sismotectonique donné. Dans l'objectif de sécuriser les installations à haut risque (centrales nucléaires, barrages, usines chimiques...), cette approche consiste à déterminer pour un site donné un "séisme de référence". Cet événement peut correspondre au séisme maximal historiquement vraisemblable (SMHV) ou au séisme majoré de sécurité (SMS), tous deux caractérisés par une valeur d'intensité [Madariaga et Perrier, 1991]. L'intensité du premier correspond à celle du séisme maximal connu dans le contexte tectonique étudié et considéré comme pouvant se produire à la verticale du site sensible considéré ou bien ramené au plus près de ce même site mais en restant sur l'accident tectonique identifié. Celle du second (SMS) est égale à l'intensité du premier à laquelle on ajoute un degré, soit $I(\text{SMS}) = I(\text{SMHV}) + 1$.

La caractérisation de l'aléa sismique nécessite de connaître - parmi les facteurs les plus importants - le contexte tectonique et géologique du site d'étude, la localisation des failles actives, la sismicité historique et la sismicité instrumentale. Cependant, les effets d'un séisme dépendent d'un autre paramètre, les effets de site.

³La sismicité historique correspond aux séismes du passé, localisés et caractérisés à partir d'archives (registres paroissiaux, récits, gravures...) et souvent validés par des vérifications de terrain (recherche de la faille à l'origine du séisme, archéosismologie, paléosismologie...).

⁴ M_W : magnitude d'énergie.

⁵ M_L : magnitude locale.

⁶ m_B : magnitude des ondes de volume.

⁷ M_S : magnitude des ondes de surface.

2.1.2 Variabilité des effets d'un séisme à l'échelle infra-communale : les effets de site

Les ondes sismiques ne s'atténuent jamais de manière linéaire lorsque l'on s'éloigne du foyer ⁸, elles peuvent être localement atténuées ou amplifiées : ce sont les "effets de site".

2.1.2.1 Définition

Les "effets de site" correspondent aux effets d'amplification des ondes sismiques dus aux propriétés géomécaniques et géométriques du sol. Les séismes de San Francisco (États-Unis), en 1906, et de Lambesc (Provence, France), en 1909, illustrent bien le lien étroit entre les intensités observées et, respectivement, la géologie de surface et la topographie. Dans le cas du séisme de Lambesc, les bâtiments localisés au sommet et sur les versants de la colline de Rognes ont souffert de graves destructions, alors que ceux situés au pied de cette colline ont été moins largement touchés (fig. 2.1). Plus récemment, les dommages observés sur les bâtiments suite à un séisme ont permis d'identifier des effets de site, comme ce fut le cas pour les séismes de Loma Prieta (États-Unis, 1989), Kobé (Japon, 1995), Epagny (Savoie, 1996), Izmit (Turquie, 1999) et Boumerdès (Algérie, 2003).



FIG. 2.1 – Dommages supportés par la commune de Rognes suite au séisme de Lambesc (11 juillet 1909, $I_0 = IX$). La variabilité spatiale des dégâts dont a souffert la commune de Rognes illustre les effets de site topographiques. Les bâtiments localisés au sommet et sur les versants de la colline ont souffert de graves destructions ; ceux situés au pied du relief ont été moins touchés (source : MEDD et METLTM, 2002).

Les effets de site ont deux origines : géologique et topographique. Dans le premier cas, les amplifications les plus importantes sont observées lorsque le substrat est peu consolidé, comme ce fut par exemple le cas pour le séisme de Michoacan-Guerrero (Mexique) de 1985 ($M_S = 8.1$). Ce séisme sous-marin n'a causé que de faibles dommages aux villes côtières mexicaines. En revanche, la ville de Mexico, localisée à plus de 300 km de l'épicentre, a subi

⁸Point de départ de la rupture des roches.

d'importantes destructions et plus de 3 000 morts ont été recensés. On peut expliquer ce phénomène par le fait que la ville de Mexico est construite sur d'épais sédiments lacustres. Les ondes sismiques y sont fortement amplifiées car elles se retrouvent piégées dans ces sols peu consolidés ; on observe alors des phénomènes de résonance et de réflexions multiples. A l'opposé, un site au rocher n'est pas affecté par des effets de site (fig. 2.2).

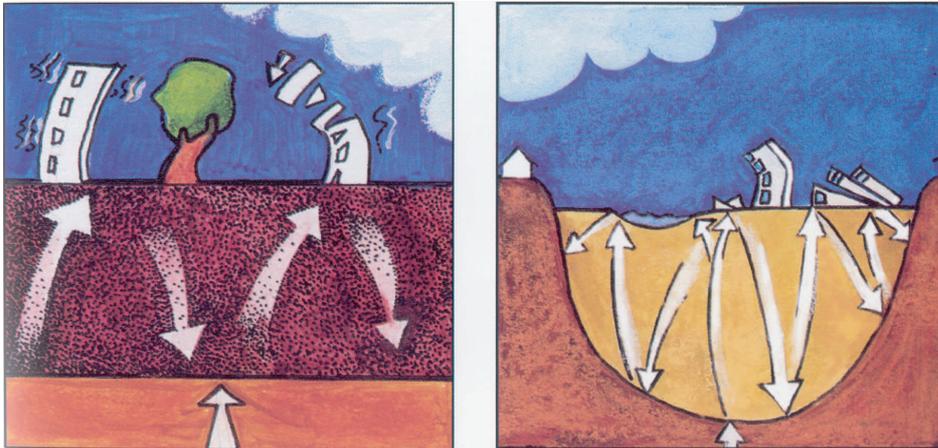


FIG. 2.2 – Effets de site géologiques. A gauche, les effets de site sont dus à un contraste d'impédance entre deux couches superposées. A droite, ils proviennent d'un remplissage alluvionnaire : dans ce cas, la maison sur le rocher ne subit pas d'effets de site (source : Laurence Barret in MEDD et METLTM, 2002).

Les effets de site topographiques ont pour résultat une amplification ou une atténuation des ondes selon la configuration du relief. Les ondes sismiques subissent des phénomènes de réflexion ou de diffraction et se trouvent concentrées dans les topographies convexes (focalisation), à l'opposé des topographies concaves [MEDD et METLTM, 2002] (fig. 2.3). On observe alors des amplifications du signal aux sommets et une atténuation dans les creux et les vallées [Riepl-Thomas et Cotton, 1999].

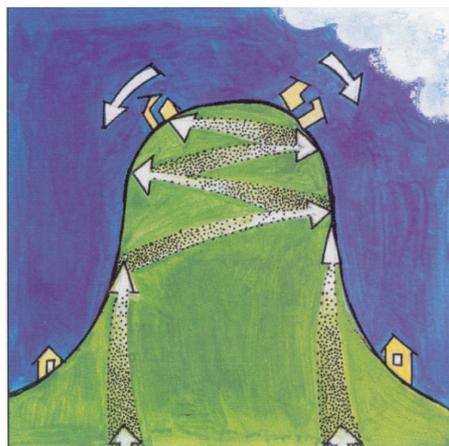


FIG. 2.3 – Effet de site topographique. Les ondes se concentrent dans la topographie convexe, où les bâtiments subissent davantage de dommages (source : Laurence Barret in MEDD et METLTM, 2002).

La variabilité des conditions géologiques ou topographiques sur de faibles distances entraîne des variations spatiales des effets de site à l'échelle infra-communale. Il n'est pas rare d'observer des dommages très contrastés entre plusieurs quartiers d'une même ville, lorsque certains bâtiments sont construits sur du rocher et qu'ils sont encore intacts, alors que d'autres, bâtis sur des sols meubles, sont totalement détruits (fig. 2.4⁹). Étant donné que les ondes sismiques peuvent être amplifiées localement par un facteur allant parfois jusqu'à dix, il est primordial d'identifier ces effets de site et de connaître leur variation spatiale à l'échelle infra-communale.



FIG. 2.4 – Variabilité spatiale des dommages suite au séisme d'Izmit (Turquie, 17 août 1999; $M_W = 7.4$). Cette variabilité illustre des effets de site géologiques et le non-respect des règles de construction élémentaires.

A l'heure actuelle, la prévention du risque sismique est effectuée à l'échelle cantonale, puisque cette unité administrative constitue l'unité de base du zonage sismique français (PS-92). Cependant, les effets d'un séisme peuvent fortement varier au sein d'un même canton, voire d'une ville. Le législateur ne prend pas en compte actuellement l'ensemble des manifestations d'un séisme ; pourtant, l'application de normes parasismiques aux bâtiments, par l'intermédiaire d'un zonage, devrait tenir compte des effets de site.

⁹Les effets de site ne sont pas les seuls responsables des dommages subis par ces bâtiments : le mode de construction est également à mettre en cause.

2.1.2.2 Méthodes d'estimation des effets de site

Il existe aujourd'hui un certain nombre de méthodes d'estimation des effets de site, que l'on peut classer en deux grandes catégories [Rosset *et al.*, 2002] :

- les méthodes numériques, basées sur des classifications de sols [Bauer *et al.*, 2001], qui requièrent une bonne connaissance de la structure géologique locale ;
- les méthodes instrumentales, basées sur des enregistrements sismiques.

Ces dernières peuvent être classées en plusieurs catégories, comme indiqué par le tableau 2.1 [Borcherdt, 1970 ; Le Brun *et al.*, 2001 ; Riepl, 1997 ; Akyol *et al.*, 2002].

Signal enregistré Avec ou sans site de référence	Avec un site de référence (site/site de référence)	Sans site de référence (H/V)
Séismes	Rapports spectraux (Standard Spectral Ratio, SSR)	Fonctions récepteurs (Receiver Function, RF)
Bruit sismique	Rapport spectral de bruit sismique avec site de référence (H/Vréf)	Rapport H/V (H/V, Nakamura)

TAB. 2.1 – *Classification des méthodes instrumentales d'estimation des effets de site (à partir d'enregistrements de signaux sismiques). H : composante horizontale ; V : composante verticale. Les méthodes instrumentales peuvent être classées de deux façon : en fonction de la nature du signal enregistré (séismes/bruit sismique) ou en fonction du type de traitement opéré (avec un site de référence ou en calculant un rapport de la composante horizontale sur la composante verticale, H/V).*

L'ensemble des méthodes instrumentales consiste à enregistrer des signaux (séismes ou bruit sismique) en différents points de la région étudiée, à l'aide de stations de mesures constituées d'un sismomètre ou d'un accéléromètre et d'un système d'acquisition, puis à procéder à des traitements sur les signaux enregistrés (rapports des spectres de Fourier, dits "rapports spectraux"). L'interprétation des rapports spectraux obtenus permet de déterminer les deux paramètres de description des effets de site, à savoir la fréquence fondamentale de résonance f_0 (la fréquence à laquelle le site considéré va entrer en résonance) et le facteur d'amplification A_0 pour cette fréquence fondamentale (le facteur avec lequel les ondes sismiques vont être amplifiées) (fig. 2.5).

Les méthodes avec site de référence (SSR et H/Vréf) consistent à effectuer le rapport du spectre calculé au site étudié sur le spectre obtenu au site de référence, qui correspond à un site "au rocher", c'est-à-dire sans effets de site. Le choix de ce site de référence est souvent problématique, surtout dans des régions où la géologie est constituée principalement de sols non consolidés (alluvions) et où la roche mère affleure rarement [Guéguen *et al.*, 2000]. Dans ce cas, les méthodes sans site de référence (RF, H/V) peuvent être mises en œuvre. Elles consistent à calculer des rapports spectraux de la composante horizontale du signal enregistré sur sa composante verticale ; le signal correspond respectivement à des séismes ou à du bruit sismique.

Le bruit sismique correspond aux vibrations continues du sol. On peut le décomposer en deux types de bruit sismique [Sèbe, 1998] : le bruit macrosismique, un phénomène

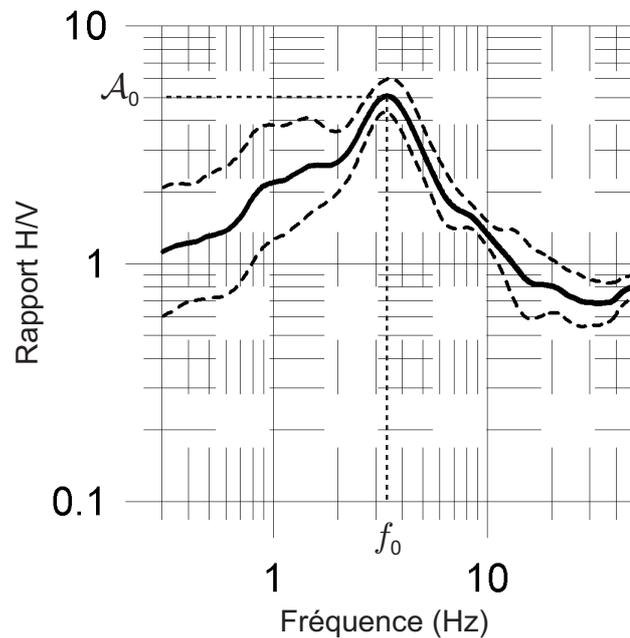


FIG. 2.5 – Exemple de rapport spectral. Le pic identifié indique la fréquence de résonance f_0 (ici, 3.2 Hz) et le facteur d'amplification A_0 à cette fréquence (égal à 5 dans cet exemple).

global dont la source essentielle est la houle des océans, et le bruit microsismique, un phénomène local qui a pour origine le vent, relayé par les racines des arbres, et les autres phénomènes hydrologiques et atmosphériques, ainsi que l'activité anthropique. C'est un signal que l'on peut enregistrer continuellement, même s'il est déconseillé de faire des mesures dans certaines conditions climatiques (par exemple, les mesures sur sol gelé ou par grand vent doivent être évitées [WP02 SESAME Project, 2003 ; Koller *et al.*, 2004]). La variabilité de l'activité anthropique et des conditions climatiques entraîne des variations diurnes, saisonnières et spatiales du bruit sismique.

Chacune des méthodes d'estimation des effets de site par enregistrement de signaux sismiques possède des avantages et des inconvénients :

- **les méthodes avec site de référence (SSR, H/V_{réf})** nécessitent de connaître ou de déterminer empiriquement un site de référence dans la région d'étude. Par ailleurs, ces méthodes requièrent que l'ensemble des stations mises en place pour la campagne de mesures enregistrent simultanément le signal, ce qui n'est pas toujours possible dans le cas de séismes (stations temporairement hors-service, problème d'enregistrement des données sur le disque de stockage sur site, rapport signal sur bruit trop faible...);
- **les méthodes basées sur des enregistrements de séismes (SSR, RF)** impliquent que la sismicité locale soit suffisamment importante pour enregistrer des séismes sur une période donnée, qui peut s'avérer courte si la disponibilité du matériel le contraint;
- **les méthodes avec site de référence (SSR, H/V_{réf}) ou avec enregistrement de séismes (SSR, RF)** nécessitent l'installation d'un réseau temporaire de stations, ce qui requiert que l'on dispose d'un nombre important de stations si l'on souhaite connaître les

effets de site avec une précision suffisante (ce qui implique une densité de stations élevée) tout en couvrant une zone assez étendue.

L'objectif dans notre étude est d'avoir une connaissance précise des effets de site à échelle infra-communale. Notre région d'étude, comme nous le verrons dans le troisième chapitre, est caractérisée par une sismicité faible à moyenne et par une géologie de surface composée majoritairement d'alluvions ou de sols peu consolidés. D'une part, il n'est pas possible de se contenter de quelques points de mesure, d'autre part, il sera difficile de déterminer un site de référence au rocher. Ainsi, les méthodes avec site de référence (SSR, H/V_{réf}) et celle des fonctions récepteurs (RF) sont dans un premier temps écartées, au profit de la méthode H/V, dite de Nakamura [Ojeda et Escallon, 2000 ; Nakamura, 1989].

Cette méthode est basée sur plusieurs hypothèses. La première consiste à dire que l'effet de site est plus significatif sur la composante horizontale que sur la composante verticale [Boitel, 2001] et que l'on peut ainsi connaître les effets de site en procédant à un rapport spectral de la composante horizontale par la composante verticale, ce qui permet du reste d'éliminer l'effet instrumental du signal enregistré. Par ailleurs, la deuxième hypothèse considère que la réponse des couches sédimentaires au bruit de fond est la même que leur réponse aux sources sismiques [Boitel, 2001] et qu'il n'y a pas d'effets non linéaires du mouvement du sol [Sèbe, 1998] : pourtant, K. Aki a montré que les résultats de l'étude de mouvements faibles (bruit sismique) avaient tendance à surestimer les effets de site par rapport aux effets de mouvements forts [Aki, 1993]. Ensuite, la méthode H/V est fondée sur le fait que le bruit sismique ambiant est constitué majoritairement d'ondes de surface. L'origine du pic est cependant controversée : pour certains, il est lié au mouvement elliptique de particules du sol en raison de la prédominance des ondes de Rayleigh dans la composante verticale [WP12 SESAME Project, 2004]. A l'opposé, d'autres auteurs estiment que le pic du rapport H/V est principalement lié aux ondes SH¹⁰ [Nakamura, 1989 ; Nakamura, 2000]. Toutefois, si le contraste d'impédance entre les formations de surface et celles plus profondes est suffisamment important, un pic net autour de la fréquence fondamentale d'un site peut être observé [Bard, 1999].

L'ensemble de la communauté scientifique s'accorde à dire actuellement que la méthode de Nakamura permet de déterminer la fréquence fondamentale de résonance d'un site ; de nombreuses études expérimentales l'ont d'ailleurs montré [Ohmachi *et al.*, 1991 ; Lermo *et al.*, 1992 ; Fiedl et K.Jacob, 1993 ; Duval, 1994 ; Yamanuka *et al.*, 1994 ; Dravinski *et al.*, 1996 ; Gitterman *et al.*, 1996 ; Fäh *et al.*, 1997 ; Guéguen *et al.*, 2000 ; Moya *et al.*, 2000 ; Zaslavsky *et al.*, 2000 ; Le Brun *et al.*, 2001]. Des études comparatives de détermination des effets de site selon les différentes méthodes citées par le tableau 2.1 montrent que la fréquence fondamentale obtenue est la même [Field et Jacob, 1995 ; Riepl, 1997 ; Lachet *et al.*, 1996 ; Le Brun, 1997 ; Akyol *et al.*, 2002]. Cependant, les opinions divergent en ce qui concerne le potentiel de la méthode de Nakamura à estimer le facteur d'amplification à cette fréquence de résonance. Certains auteurs estiment que la méthode est performante [Ohmachi *et al.*, 1991 ; Nakamura, 2000 ; Lermo *et al.*, 1992], affirmant même que le facteur d'amplification obtenu est plus réaliste que celui estimé par la méthode des SSR [Nakamura, 2000]. D'autres auteurs émettent des doutes à ce propos [Lermo et Chavez-Garcia, 1993 ; Lachet et Bard, 1994 ; Duval, 1994 ; Kudo, 1995 ; Dravinski *et al.*, 1996 ; Bard *et al.*, 1997 ;

¹⁰On peut décomposer les ondes S (ondes de cisaillement) en deux ondes : les ondes SH (H pour horizontal), dont la direction de vibration est perpendiculaire au plan d'incidence (plan contenant la verticale et la direction de propagation des ondes S) et les ondes SV (V pour vertical), dont la direction est dans le plan d'incidence. Source : F. Chambat et F. Kalfoun, 2004. Laboratoire des Sciences de la Terre, ENS Lyon. www.ens-lyon.fr.

Lacave *et al.*, 1999 ; Le Brun *et al.*, 2001 ; WP12 SESAME Project, 2004]. En effet, il semblerait que les rapports spectraux de bruit sismique aient tendance à sous-estimer le facteur d'amplification [Bard, 1999]. La capacité de la méthode de Nakamura à déterminer le facteur d'amplification varie en fonction des sites étudiés, même si une majorité d'auteurs s'accordent pour considérer avec précaution les valeurs obtenues.

Cependant, tous s'entendent sur les avantages de cette méthode, à savoir 1/ d'être adaptée à l'estimation des effets de site dans des zones de sismicité faible à moyenne, 2/ de requérir une seule station mobile et 3/ de ne pas nécessiter de site de référence. C'est donc une méthode adaptée à des régions caractérisées par une géologie de surface dominée par les alluvions ou autres sols peu consolidés. Cependant, étant donné la toute relative confiance accordée à la méthode de Nakamura pour estimer le facteur d'amplification, nous avons choisi de mettre en œuvre une seconde méthode, qui semble adaptée au contexte tectonique et géologique local, la méthode des fonctions récepteurs. Elle correspond à une combinaison entre la méthode "receiver function" de C. A. Langston [Langston, 1979], à l'origine utilisée pour détecter des interfaces, et celle de Y. Nakamura [Nakamura, 1989 ; Nakamura, 1996].

La méthode des fonctions récepteurs ne fait pas vraiment l'objet de controverses, à l'opposé de celle de Nakamura. Pourtant, les auteurs ayant comparé les facteurs d'amplification obtenus par différentes méthodes ne sont pas unanimes. D'après les travaux de J. Lermo et F. Chavez-Garcia [Lermo et Chavez-Garcia, 1993], N. Akyol *et al.* [Akyol *et al.*, 2002], Zaslavsky *et al.* [Zaslavsky *et al.*, 2000], K. Atakan *et al.* [Atakan *et al.*, 1997] et P. Guéguen *et al.* [Guéguen *et al.*, 2000], les résultats obtenus par les fonctions récepteurs et par la méthode des rapports spectraux standards sont comparables en termes de fréquence et d'amplification. C. Lachet *et al.* [Lachet *et al.*, 1996] apportent une nuance à ce propos, puisque, dans leur cas et pour certains sites, l'amplification observée est légèrement plus faible dans le cas des fonctions récepteurs que dans le cas de la méthode des SSR, alors que A. Moya *et al.* constatent l'inverse (amplifications plus élevées avec RF qu'avec SSR ; Moya *et al.*, 2000). Enfin, M. Zare *et al.* observent pour la moitié des sites des résultats comparables quelle que soit la méthode utilisée [Zare *et al.*, 1999]. Ils précisent par ailleurs que la méthode RF semble plus stable que celle des SSR. D'une manière générale, la majorité des auteurs s'accordent tout de même à considérer que la méthode des RF est fiable pour fournir la fréquence fondamentale et le facteur d'amplification à cette fréquence.

Les deux méthodes utilisées en complémentarité pour estimer les effets de site vont être présentées dans les paragraphes suivants.

2.1.2.3 Estimation des effets de site à l'aide de la méthode de H/V

Bien que le bruit sismique soit caractérisé par une variabilité élevée selon l'heure de la journée, la saison, etc., les rapports spectraux obtenus par la méthode de Nakamura sont stables dans le temps [Beck *et al.*, 2006a ; Duval, 1994 ; Yamanuka *et al.*, 1994]. Partant de ce principe, la méthode consiste à enregistrer le bruit sismique ambiant en un certain nombre de points, une seule station étant nécessaire. Ainsi, il est possible de couvrir des surfaces relativement étendues, avec une densité de points élevée. Dans le cadre de notre étude, nous avons souhaité pouvoir couvrir l'ensemble de l'agglomération mulhousienne et, parallèlement, avoir une information plus précise autour de certains sites dits "sensibles" en relation avec la problématique des risques (fig. 2.6). Il s'agit, par exemple, de sites caractérisés par un aléa technologique important (usine chimique), une vulnérabilité élevée en raison de la sensibilité de la population présente en ce site (hôpital) ou jouant un rôle

primordial dans la gestion d'une crise, autrement dit dans la remédiation d'une catastrophe (caserne de pompiers).

Il n'est pas toujours possible de savoir quels sont les effets de site au-delà d'un point de mesure, étant donné qu'ils dépendent de la nature de la géologie de surface, de la géométrie des couches géologiques (épaisseur, organisation des couches) et de la structure tridimensionnelle. Dans certains cas simples (structure tabulaire), les effets de site peuvent être considérés comme spatialement continus (sans variation à courte longueur d'onde spatiale). Mais qu'en est-il dans le cas de structures faillées ou plissées ? Lorsque les conditions géologiques et structurales sont complexes, il est préférable de densifier les sites de mesure, de manière à aboutir à une information la plus précise possible. C'est également dans cet objectif que nous avons souhaité procéder aux enregistrements de bruit sismique selon des maillages de densité différente et diminuer la distance inter-sites dans les secteurs de géologie hétérogène ou complexe.

Finalement, nous avons procédé selon deux grilles de mesure :

- un premier maillage couvrant l'ensemble de la zone d'étude : enregistrement de bruit sismique tous les 500 m ;
- un second maillage se concentrant autour de sites sensibles et dans les secteurs de géologie complexe : des points de mesure tous les 100 à 200 m.

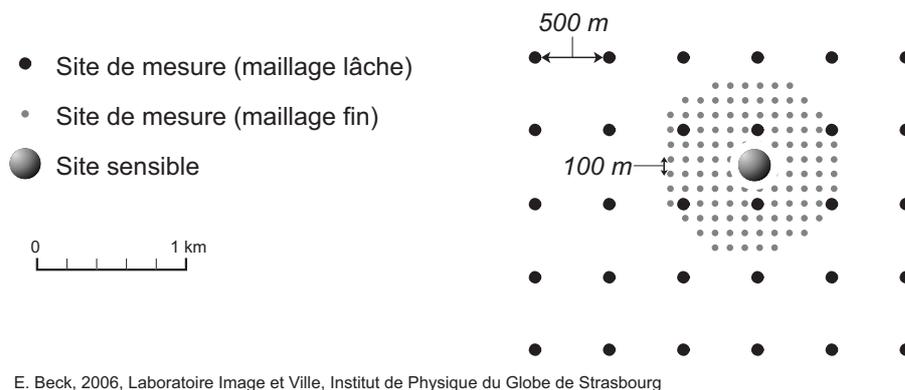


FIG. 2.6 – *Figure théorique d'emboîtement des maillages. Des mesures sont effectuées tous les 500 m dans l'ensemble de la zone d'étude ; d'autres sont réalisées tous les 100 à 200 m autour de sites "sensibles".*

Le bruit sismique est enregistré pendant 30 min en chaque site sur du substrat naturel dégagé (champ, forêt, pelouse, carré de jardin...). La station de mesure (fig. 2.7) consiste en un sismomètre et un système d'acquisition comprenant une station proprement dite (équipée d'un disque dur sur rack où sont stockés les enregistrements), une batterie et un système de localisation et de synchronisation (GPS ou DCF¹¹). Le sismomètre est orienté vers le nord et mis à niveau (à l'horizontale).

Les enregistrements sont ensuite dépouillés et on peut procéder au traitement (fig. 2.8). Le traitement des mesures sismiques a été facilité par la programmation de scripts en bash (bourne shell) et sous Scilab de manière à automatiser la procédure d'extraction et de calcul. Les différentes étapes du traitement sont adaptées de Dubos *et al.* [Dubos *et al.*,

¹¹Récepteur DCF : récepteur du signal radio DCF77, émis à Francfort (Allemagne). Le signal indique l'heure sous forme codée.

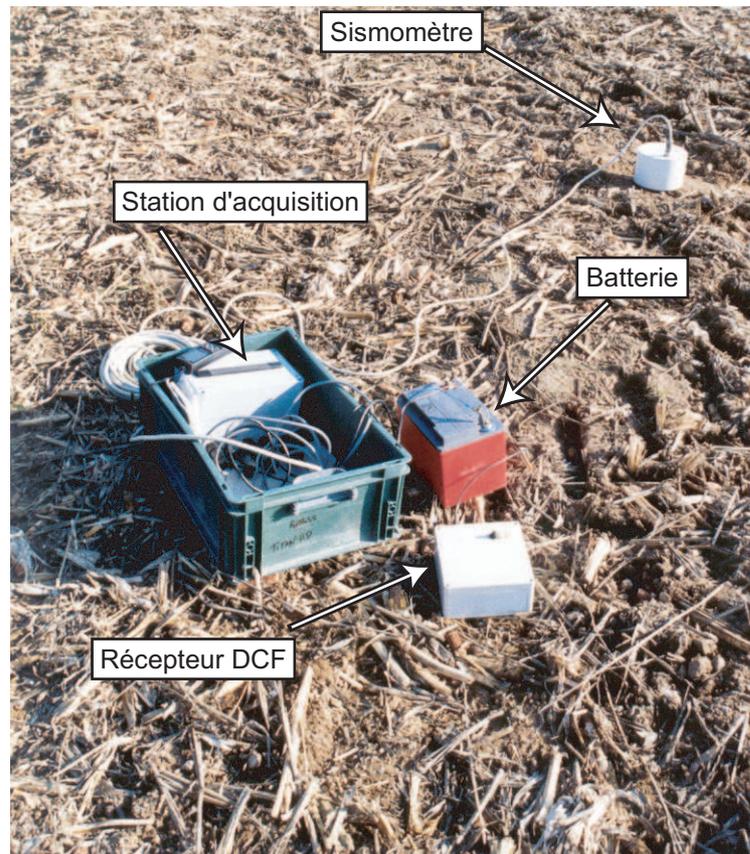
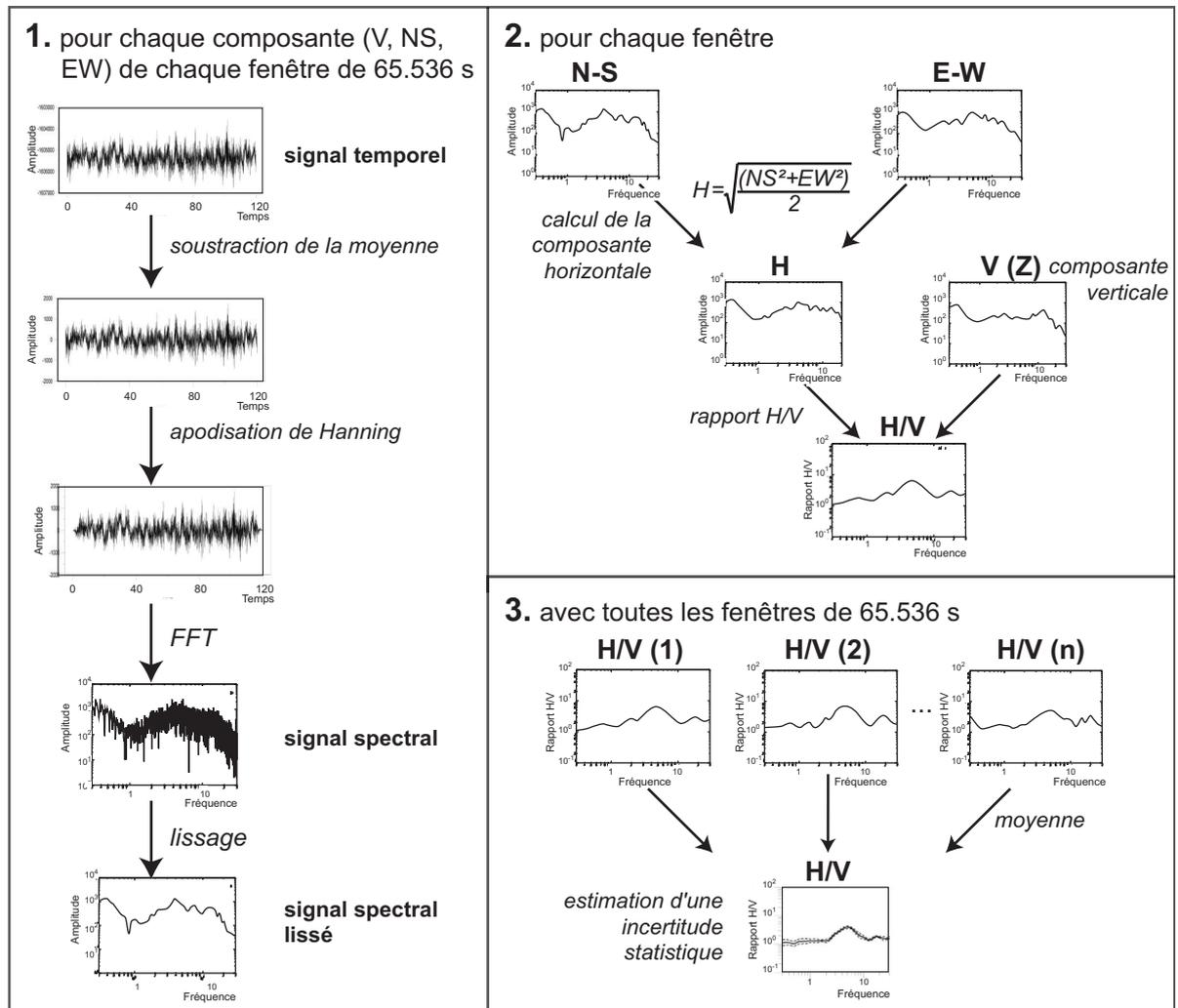


FIG. 2.7 – Station mobile d'enregistrement du bruit sismique ambiant. E. Beck, 2003. Une station est composée d'un sismomètre, d'une station d'acquisition et d'un récepteur DCF. Elle est alimentée par une batterie.

2003] et d'un programme développé par le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières)¹².



E. Beck, 2006, Laboratoire Image et Ville, Institut de Physique du Globe de Strasbourg

FIG. 2.8 – Étapes de traitement des mesures de bruit. 1/ Tout d'abord, des opérations de soustraction de la moyenne, d'apodisation de Hanning, de Transformée de Fourier rapide et de lissage sont effectuées sur chaque composante (V, NS, EW) de chaque fenêtre de bruit de 65.536 s. 2/ Le calcul de la composante horizontale et le rapport entre cette dernière et la composante verticale sont effectués pour chaque fenêtre. 3/ La moyenne entre les différentes fenêtres est calculée pour chaque signal.

A partir des données d'une journée d'enregistrement, on extrait tout d'abord la part de signal correspondant au site étudié, tout en prenant garde de couper le signal quelques minutes avant le début effectif de la mesure et quelques minutes après la fin. Puis, les dix premières et les cinq dernières minutes de cet extrait sont exclues, afin de supprimer les parties du signal perturbées par la connexion et à la déconnexion des câbles et celles correspondant à la période de stabilisation des sismomètres, qui peut durer plusieurs minutes selon le type¹³.

¹²B. Le Brun, communication personnelle.

¹³C'est par exemple le cas pour le Lennartz LE3D et le Guralp CMG40T.

Ensuite, chaque signal est découpé en fenêtres temporelles ¹⁴ de 8 192 ¹⁵ points (65.536 s, soit à peine plus d'une minute avec une fréquence d'échantillonnage de 125 Hz). Puis un certain nombre d'opérations sont effectuées sur chaque composante (verticale, nord-sud, est-ouest) de chaque fenêtre : 1- soustraction de la moyenne ; 2- apodisation de Hanning ¹⁶ ; 3- Transformée de Fourier rapide (qui permet de passer du domaine temporel au domaine fréquentiel) ; 4- lissage avec une fenêtre triangulaire glissante dont la longueur est proportionnelle à la fréquence considérée. Puis, pour chaque fenêtre temporelle de 65.536 s, la composante horizontale est calculée à l'aide de l'équation 2.1 [Dubos *et al.*, 2003] :

$$H = \sqrt{\frac{NS^2 + EW^2}{2}} \quad (2.1)$$

avec H la composante horizontale, NS la composante nord-sud et EW la composante est-ouest.

On procède alors au rapport spectral entre la composante horizontale et la composante verticale, toujours pour chaque fenêtre temporelle de 65.536 s. Au final, le rapport spectral du site étudié est obtenu par le calcul de la moyenne des rapports spectraux des différentes fenêtres. L'écart-type est également calculé ; il permet de quantifier la qualité du spectre. On peut alors passer à la phase d'interprétation des spectres afin de déterminer pour chacun les valeurs de la fréquence fondamentale et du facteur d'amplification.

L'interprétation des rapports spectraux est une tâche qui ne peut être automatisée, elle nécessite de faire appel à l'expertise humaine. Quelques critères doivent cependant être respectés :

- le pic devra se situer entre 0.5 et 10 Hz, c'est-à-dire dans la bande de fréquence qui nous intéresse en matière de risques et de génie parasismique [Sabourault *et al.*, 2001] ; ces fréquences minimale et maximale sont également contraintes par le pas d'échantillonnage, la longueur du signal et la fréquence propre de chaque capteur ;
- la fréquence du pic retenu devra être supérieure à la période propre (ramenée en Hz) du sismomètre utilisé pour effectuer la mesure ;
- le niveau minimum d'amplification du pic n'est pas défini, cependant un contraste suffisant doit être observé entre ce pic et le reste du rapport spectral.

Sur la majorité des spectres, un seul pic est identifié. Le problème se pose lorsque plusieurs pics sont observés. C. Lachet *et al.* et B. Le Brun [Lachet *et al.*, 1996 ; Le Brun, 1997] indiquent qu'il faut considérer le premier maximum du rapport en termes d'amplification. D'autres estiment qu'il faut retenir le pic dont la valeur d'amplification correspond au maximum absolu (et donc pas nécessairement le premier maximum), car la corrélation entre la fréquence fondamentale de ce deuxième pic et la géologie de surface est meilleure qu'avec le premier pic [Guéguen *et al.*, 1998 ; Guéguen *et al.*, 2000].

Il arrive que deux sites proches et de géologie de surface identique soient caractérisés par des spectres de forme différente (un des spectres avec un seul pic, dans les moyennes fréquences,

¹⁴Fenêtre temporelle : portion du signal dans le domaine temporel.

¹⁵La Transformée de Fourier rapide fonctionne avec un nombre de points égal à une puissance de 2.

¹⁶L'apodisation a pour objectif de diminuer les effets de bord liés au découpage du signal. Elle consiste à multiplier un signal par une fenêtre d'apodisation définie. Il existe plusieurs fenêtres, comme la fenêtre rectangulaire ou porte (la plus simple), celle de Hamming, celle de Blackman et celle de Hanning.

l'autre avec deux pics, dont l'un dans les basses fréquences et l'autre dans les moyennes fréquences). Nous avons décidé de considérer que la fréquence fondamentale du second site correspondait au pic dans les moyennes fréquences, partant du principe que le contexte géologique était le même pour les deux sites.

Nous avons élaboré un indicateur de qualité du spectre, qui évalue par expertise visuelle la pertinence du pic considéré comme indiquant la fréquence fondamentale du site. L'indicateur de qualité peut prendre cinq valeurs selon la forme du pic (ou de la "bosse", selon les cas ; fig. 2.9) :

- indicateur de qualité 1 : pic bien identifié, écart-type faible ;
- indicateur de qualité 2 : pic bien identifié, écart-type élevé ;
- indicateur de qualité 3 : bosse, écart-type faible ;
- indicateur de qualité 4 : bosse, écart-type élevé ;
- indicateur de qualité 5 : spectre inexploitable (écart-type trop élevé, montée dans les basses fréquences, trop de pics...).

Une fois les fréquences fondamentales déterminées, l'interprétation de leur variabilité spatiale peut être effectuée. Quant aux amplifications, la méthode de Nakamura ne permet pas *a priori* d'aboutir à une valeur absolue de ce paramètre, puisque de nombreuses études ont montré que les rapports H/V de bruit ont tendance à sous-estimer le facteur d'amplification. On doit cependant s'interroger sur la possibilité de produire une carte des amplifications relatives, si leur variabilité spatiale le permet, afin d'identifier *a minima* des secteurs susceptibles d'être plus affectés que d'autres.

Dès lors, les valeurs relatives obtenues par la méthode de Nakamura peuvent être comparées aux valeurs obtenues par la méthode des fonctions récepteurs.

2.1.2.4 Estimation des effets de site à l'aide de la méthode des fonctions récepteurs

La méthode des fonctions récepteurs, appliquée à l'origine à l'étude du manteau supérieur et de la croûte en utilisant des télé-séismes, a pour principe de procéder à des rapports spectraux H/V (tout comme la méthode de Nakamura) sur des sismogrammes et non sur le bruit sismique. Cela nécessite de réaliser une campagne de mesures d'une durée suffisante afin d'enregistrer un nombre assez élevé de séismes (fig. 2.10). Cette durée varie selon la sismicité de la région étudiée et la disponibilité du matériel de mesure.

Une fois les enregistrements effectués, on procède à leur extraction et à leur traitement. Plusieurs programmes, développés au sein du site central du RéNaSS, permettent d'automatiser cette tâche. Ils consistent, entre autres, à déterminer les séismes susceptibles d'avoir été enregistrés par le réseau temporaire, étant donné la localisation des épicentres, la magnitude des séismes et la localisation des stations de ce même réseau¹⁷, puis à extraire dans les données enregistrées en continu (indépendamment des problèmes techniques qui peuvent être rencontrés) les portions de signal correspondant aux dates d'occurrence de ces tremblements de terre. Puis les séismes dont le rapport signal sur bruit est supérieur à trois sont sélectionnés [Lachet *et al.*, 1996 ; Akyol *et al.*, 2002]. Enfin, il faut choisir la partie

¹⁷Si la magnitude du séisme est trop faible et/ou que la distance entre l'épicentre et les stations du réseau temporaire est trop importante, l'amplitude des ondes sismique est trop faible et on ne peut faire la distinction (sur le sismogramme) entre le bruit sismique et le séisme (rapport signal sur bruit trop faible).

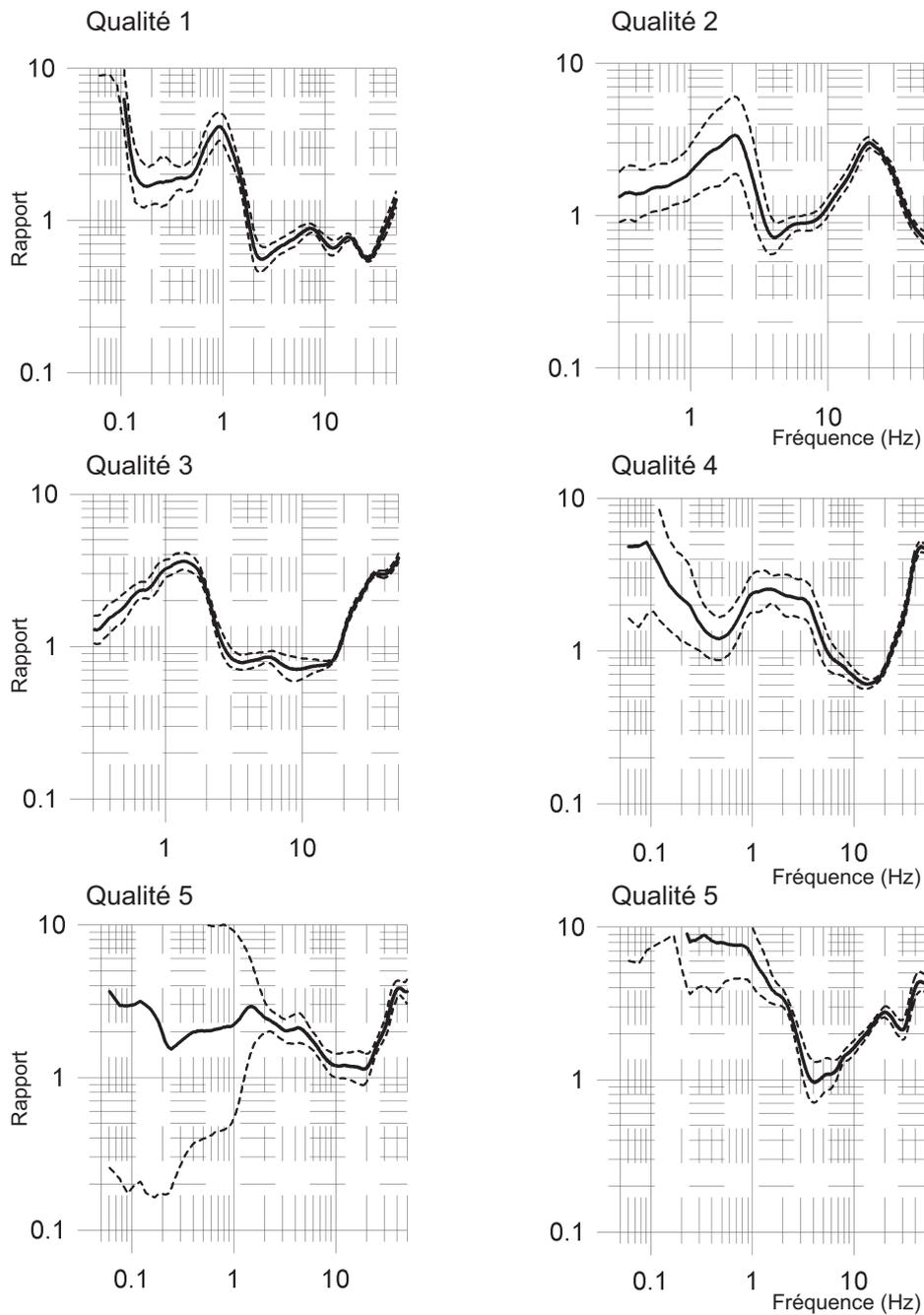


FIG. 2.9 – Exemples de spectres auxquels on a attribué des indicateurs de qualité différents. L'indicateur de qualité donne une idée de la fiabilité des valeurs de fréquence et d'amplification.

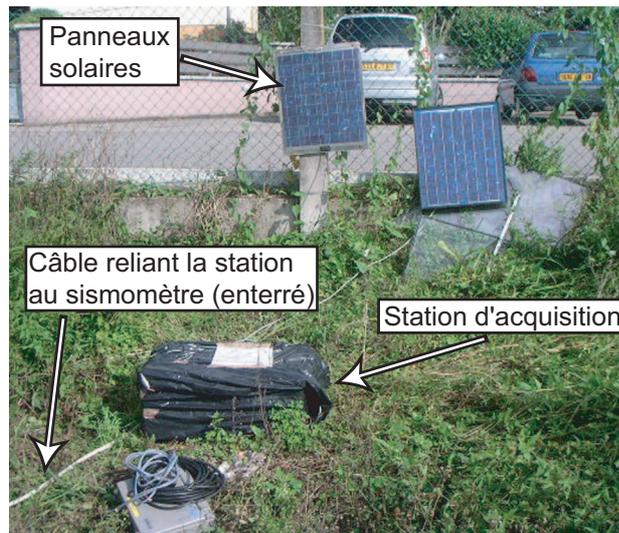


FIG. 2.10 – Exemple de station sismique temporaire. E. Beck, 2004. Elle est composée d'un sismomètre (enterré) et d'une station d'acquisition qui sont alimentés par une batterie, chargée par des panneaux solaires.

du sismogramme qui sera utilisée pour calculer les rapports spectraux. Elle varie selon les auteurs : certains considèrent l'ensemble du signal [Guéguen *et al.*, 2000], d'autres une durée fixe (quelques secondes à plusieurs dizaines de secondes) qui comprendrait entre autres les ondes de cisaillement (ondes S) [Lermo et Chavez-Garcia, 1993 ; Zare *et al.*, 1999 ; Zaslavsky *et al.*, 2000]. Mais la majorité des auteurs préfère exploiter uniquement la partie de signal correspondant aux ondes S, puisque ce sont les ondes les plus destructrices [Riepl, 1997 ; Atakan *et al.*, 1997 ; Akyol *et al.*, 2002]. Dans notre cas, nous avons choisi la troisième solution car elle permet de prendre en considération un même type d'ondes, ce qui n'est pas forcément le cas pour les deux autres méthodes. Ce choix nécessite une étape supplémentaire et préalable au traitement du signal proprement dit, celle du pointé des ondes S sur les sismogrammes sélectionnés automatiquement et de l'extraction de cette portion du signal sur laquelle seront effectués les calculs.

Ensuite, les étapes de traitement des signaux sont identiques à celles exécutées dans le cadre de la méthode de Nakamura (fig. 2.8), excepté que les fenêtres temporelles sont dans ce cas des fenêtres d'ondes S de différents séismes : pour chaque station, un rapport spectral est calculé pour chaque séisme et le spectre final de la station correspond à la moyenne entre les rapports spectraux des séismes. Les effets de site sont alors déterminés de la même manière que dans le cas de la méthode de Nakamura, c'est-à-dire en identifiant le pic correspondant à la fréquence fondamentale et en retenant les valeurs de fréquence et d'amplification.

2.1.2.5 Correspondance entre les fréquences mesurées et les fréquences théoriques

La corrélation entre la géologie de surface et les fréquences fondamentales peut être analysée par un modèle 1D. Il existe différentes méthodes pour déterminer cette fréquence, dont cinq sont citées par J. Rey [Rey, 2000] :

- la moyenne pondérée des vitesses des ondes S [Dobry *et al.*, 1976] ;
- les moyennes pondérées des modules de cisaillement et des densités ;
- la somme des fréquences naturelles pour chaque couche : il faut alors connaître les caractéristiques de chacune d'entre elles ;
- une approximation linéaire du mode fondamental ;
- une version simplifiée de la méthode de Rayleigh.

La première méthode, la plus simple à mettre en place car nécessitant peu de données, s'écrit comme suit (équ. 2.2) :

$$f_t = \frac{V_s}{4h} \quad (2.2)$$

avec f_t la fréquence fondamentale théorique calculée à partir de ce modèle, V_s la vitesse des ondes S (ou ondes de cisaillement) de la formation géologique de surface et h l'épaisseur de la formation géologique.

L'application de ce modèle 1D requiert d'avoir des données sur les épaisseurs et les vitesses d'ondes S, qui peuvent être fournies respectivement par les forages et les mesures SASW (spectral analysis of surface waves). Il s'agit d'une méthode permettant de connaître la variation verticale des vitesses des ondes S des différentes couches géologiques superposées.

Ce modèle 1D est fondé sur le principe que le pic du rapport H/V indique un contraste de vitesses entre deux couches géologiques et donc une interface à une profondeur donnée entre deux couches de nature différente. Théoriquement, connaissant les vitesses d'ondes S de la géologie de surface en un site donné, on devrait pouvoir faire correspondre la fréquence fondamentale obtenue par le rapport H/V avec une interface entre deux couches, indiquée par le forage. La fréquence étant inversement liée à l'épaisseur de la couche (donc à la profondeur du mur de la couche affleurante), plus la fréquence fondamentale rencontrée est faible, plus l'interface entre les deux couches est profonde.

La confrontation des fréquences fondamentales calculées par la méthode H/V avec les fréquences théoriques calculées par le biais du modèle 1D constitue une étape importante à l'estimation des effets de site car elle permet de valider les valeurs de f_0 obtenues.

2.1.2.6 Interpolation des valeurs de fréquences fondamentales

A propos de l'interprétation des données ponctuelles de fréquence fondamentale ou d'amplification, toute la difficulté est de restituer une information spatialement continue, étant donné la grande variabilité spatiale des caractéristiques géomécaniques et géométriques du sous-sol qui peut exister. Pour pouvoir prendre en compte les effets de site dans la simulation des effets d'un séisme, ce qui requiert d'avoir une information sous forme continue, nous avons besoin de spatialiser les effets de site.

L'interpolation (ou spatialisation continue) permet d'obtenir à partir de mesures ponctuelles une représentation d'un phénomène en tous points de la surface d'étude, suivant une grille prédéfinie. Mais cette opération requiert deux conditions : que l'on puisse déduire la valeur en tout point de l'espace à partir de quelques points pour lesquelles l'information est connue ; que le phénomène à représenter soit continu [Tobler, 1976].

Dans le cas des effets de site, la première condition est remplie si l'on considère deux points relativement proches et des conditions géologiques homogènes, du point de vue lithologique et structural, c'est-à-dire une structure géologique simple. D'après A.-M. Duval, la stabilité spatiale du rapport H/V est d'ailleurs assurée si la structure du sous-sol est homogène [Duval, 1994]. La deuxième condition est remplie, excepté lorsque des variations brusques de la géologie de surface sont observées.

Dans notre cas, nous sommes confrontée à une structure géologique à la fois simple et complexe, puisqu'une partie de la région étudiée est faillée, ce qui constitue un frein à l'interpolation.

Conceptuellement et physiquement, la carte obtenue par interpolation ne peut être considérée comme vraie mais comme un document de travail, puisque les valeurs issues de l'interpolation ne représentent pas une mesure réelle, excepté aux points de mesure de bruit sismique. Des mesures de bruit supplémentaires selon un maillage plus resserré (quelques dizaines de mètres tout au plus entre deux points) seraient nécessaires, notamment dans le secteur sud-est, pour que l'on puisse s'approcher davantage de la réalité et valider une telle carte.

Les résultats issus d'une interpolation dépendent de l'interpolateur choisi [Beck, 2002]. Deux catégories d'interpolateurs peuvent être distinguées : les interpolateurs exacts et les interpolateurs lissants. Les interpolateurs exacts conservent les valeurs des points de mesure, ce qui est une condition indispensable si l'on souhaite interpoler les valeurs de fréquence fondamentale.

Il existe différents interpolateurs exacts [Golden Software, 2002] :

- plus proche voisin ;
- triangulation avec interpolation linéaire ;
- voisin naturel.

Certains interpolateurs lissants deviennent des interpolateurs exacts si certaines conditions sont respectées. C'est le cas des méthodes suivantes :

- distance inverse à une puissance : si un facteur de lissage n'est pas spécifié ;
- krigeage : si un effet pépité ¹⁸ n'est pas précisé ;
- fonction à base radiale : lorsqu'on ne précise pas la valeur du R^2 ;
- méthode de Shepard modifiée : si un facteur de lissage n'est pas spécifié.

Le choix de l'interpolateur (ou méthode d'interpolation) dépend aussi d'autres critères : le nombre de points de mesures dans la grille de départ, la répartition spatiale des points, le phénomène à interpoler. La notice de Surfer, logiciel d'interpolation produit par Golden Software, propose quelques indications à ce sujet [Golden Software, 2002].

¹⁸L'effet pépité permet d'introduire une marge d'erreurs.

Concernant le premier critère, les méthodes de triangulation avec interpolation linéaire, de fonction à base radiale et le krigeage s'avèrent performantes pour des ensembles de 250 à 1 000 points d'observation.

La répartition spatiale des points peut également guider dans le choix de la méthode : par exemple, la méthode du "voisin naturel" crée des isolignes lorsque la répartition spatiale des données est inégale en termes de densité de points mais ne crée pas de données là où il n'y en a pas ; au contraire, la méthode des plus proches voisins permet de combler des trous dans un ensemble de données où les points sont répartis de manière assez régulière.

Les résultats obtenus varient également suivant la méthode utilisée : par exemple, la "distance inverse à une puissance" a tendance à générer des effets "yeux de bœuf" (cercles concentriques autour des points de mesure). A l'opposé, le krigeage et la méthode "fonction à base radiale" fournissent des résultats satisfaisants pour la plupart des ensembles de données.

Enfin, concernant le type de phénomène à représenter, le krigeage est une méthode géostatistique très répandue dans les disciplines scientifiques, y compris les géosciences [Sèbe, 1998]. Le krigeage est fondé sur l'hypothèse selon laquelle il y a une dépendance entre les valeurs et que celle-ci diminue avec l'éloignement. Contrairement aux autres méthodes, le krigeage est caractérisé par une analyse préalable des données aboutissant à un modèle de variogramme, qui indique la variabilité spatiale des données.

A la vue de ces différentes indications et étant donné les caractéristiques de nos données et l'objectif de notre étude, nous avons opté pour une interpolation par krigeage.

Une fois l'interpolateur choisi, il faut déterminer l'outil le plus adapté pour procéder à une interpolation fiable. Il existe de nombreux logiciels permettant d'interpoler des données ponctuelles, comme Surfer, ArcGis, etc. Ce sont des logiciels fonctionnant trop souvent comme des boîtes noires, c'est pourquoi nous avons préféré utiliser un programme écrit par N. Blond (Laboratoire Image et Ville) dans le cadre de sa thèse [Blond, 2002 ; Blond *et al.*, 2003].

Le choix de la résolution spatiale s'impose également. Nous avons décidé de nous caler sur les maillages établis pour les mesures de bruit et de considérer que la résolution spatiale correspondrait à la distance minimale entre deux points de mesures. Les mesures étant effectuées au minimum tous les 100 m, nous avons choisi cette résolution spatiale.

2.1.3 Simulation des effets d'un séisme

Simuler les effets d'un séisme équivaut à évaluer les dégâts qu'il pourrait causer, selon un scénario défini (magnitude, localisation de l'épicentre). Dans un premier temps, il est nécessaire de simuler les effets d'un séisme, sans considération des bâtiments. Ceci est possible par l'intermédiaire de deux méthodes : la méthode des fonctions de Green empiriques et l'application d'une loi d'atténuation (voir ci-dessous). La méthode des fonctions de Green empiriques, mise au point par S.H. Hartzell [Hartzell, 1978], consiste à simuler le mouvement du sol lors de séismes majeurs à partir d'enregistrements de petits séismes [Le Brun, 1997]. Les valeurs d'accélération maximale obtenues par la méthode des fonctions de Green empiriques diffèrent de celles obtenues par les lois d'atténuation, mais on ne peut cependant tirer de conclusion de ce résultat, étant donné que ces deux approches sont basées sur des principes différents [Wössner *et al.*, 2002].

Dans le cas d'une simulation d'un séisme à l'aide d'une loi d'atténuation, la prise en compte de la vulnérabilité du bâtiment permet de prévoir le nombre de bâtiments totalement détruits, fragilisés ou demeurant intacts. Il est nécessaire d'avoir recours à des fonctions d'impact qui déterminent le degré d'endommagement des bâtiments à partir de l'accélération maximale (ou l'intensité) calculée et du type de bâtiment (suivant la typologie de l'EMS-98¹⁹ ou le matériau de construction des bâtiments) [Winckell *et al.*, 2000 ; BRGM, 2004 ; Chatelain *et al.*, 1996].

Ces méthodes nous semblent peu évidentes à développer à l'échelle d'une agglomération car 1/ elles reposent sur une hypothèse forte sur la relation entre type de bâtiments et dommages supportés ; 2/ elles nécessitent une base de données riche en attributs et exhaustive si l'on souhaite obtenir des résultats probants.

Depuis quelques années, les scientifiques suisses procèdent à des simulations de séismes, dans l'objectif, notamment, de reproduire le séisme de Bâle (1356) dans le contexte urbain et économique d'aujourd'hui [Fäh *et al.*, 2001]. Les interactions avec les industries chimiques et dangereuses de la ville de Bâle ne sont pas considérées dans les scénarios. Il en ressort néanmoins que le centre historique de la ville souffrirait de dommages importants, notamment en raison de conditions de sol défavorables (effets de site), et que la ville serait touchée de 31 à 56 % selon les quartiers, si un séisme d'intensité IX venait à se produire.

En France, le BRGM a développé une méthodologie de simulation des séismes, dont le site d'application initial est la ville de Nice [Arnal et Martin, 1999 ; Mouroux *et al.*, 2004]. Depuis, cette approche a été appliquée à la ville de Mulhouse (les résultats sont présentés au paragraphe 3.2.1.2) et à la Guadeloupe.

Simuler les effets d'un séisme revient, dans le contexte de ce travail de thèse, à estimer des valeurs d'amplitude (accélération ou vitesse) ou d'intensité en tous points de la zone étudiée, en fonction de la distance à l'épicentre, de la magnitude du séisme et en tenant compte des effets d'amplification et d'atténuation locaux.

Cette simulation nécessite ainsi d'avoir une connaissance préalable de l'aléa sismique, c'est-à-dire de la sismicité historique et instrumentale et du contexte tectonique local (plus précisément, la localisation des failles actives), des effets de site et d'une loi d'atténuation adaptée au contexte local étudié.

Plusieurs scénarios peuvent être envisagés en fonction de la localisation des failles actives. Le choix du scénario peut être lié à une problématique particulière, qui amènerait à considérer un scénario majorant et de ce fait très destructeur : on peut, par exemple, choisir de localiser l'épicentre directement sous le centre historique d'une ville ou à proximité directe d'une usine dangereuse. A l'opposé, on peut retenir un scénario moins pénalisant mais plus réaliste, élaboré à partir de l'analyse de la sismicité historique et instrumentale et de la localisation des failles actives. Le problème se pose lorsque les failles actives ne sont pas identifiées, ni localisées avec précision. Il faut alors davantage considérer la localisation, l'intensité et/ou la magnitude des séismes du passé. Dans notre cas, nous nous fonderons sur la reconnaissance des failles actives et sur le SMHV.

Les lois d'atténuation sont des lois empiriques ou semi-empiriques qui visent à relier, à certaines fréquences ou sur une bande de fréquence définie, pour un domaine de magnitude donné, le mouvement (déplacement, vitesse ou accélération) maximum du sol en fonction

¹⁹Echelle macrosismique européenne (cf. *infra*).

des paramètres du séisme, à savoir sa magnitude, la distance source-site observé, et, dans certains cas, la géologie au niveau du point d'observation.

Certaines lois d'atténuation sont calculées à l'échelle nationale [Dahle *et al.*, 1995 ; Theodulidis et Papazachos, 1992] ou par région sismotectonique homogène [Marin *et al.*, 2004]. Toutefois, les lois peuvent être affinées pour être valables dans un contexte local. Cela nécessite cependant de pouvoir enregistrer suffisamment de mouvements forts, ce qui n'est pas toujours possible si la sismicité de la région étudiée est trop faible. Par exemple, G. Boitel [Boitel, 2001] a calculé une loi d'atténuation pour la région de Bâle-Mulhouse à partir de séismes locaux, de magnitude faible (comprise entre 1.5 et 3.7). De plus, la loi qu'il a calculée donne une estimation des vitesses maximales, alors que nous souhaitons simuler les accélérations maximales du sol. Pour ces raisons (magnitude faible et estimation des vitesses), nous n'avons choisi cette loi d'atténuation.

En l'absence de loi d'atténuation spécifique à notre zone d'étude, nous avons choisi une loi d'atténuation globale (équ. 2.3) prédisant des valeurs d'accélération horizontale maximale du sol (PGA²⁰), élaborée au rocher à partir de mouvements modérés à forts (magnitudes comprises entre 4 et 7.5) et applicable à l'Europe [Ambraseys *et al.*, 1996]. Elle est donc adaptée à notre étude en termes de magnitude et de zone d'application. Il s'agit d'une loi utilisée dans le cadre de nombreuses études et qui a montré des résultats concluants [Wössner *et al.*, 2002 ; Di Pasquale *et al.*, 2004].

$$\log(a) = -1.39 + 0.266M_S - 0.92 \log\left(\sqrt{d^2 + 12.25}\right) + 0.25P \quad (2.3)$$

avec a l'accélération (en g), M_S la magnitude des ondes de surface, d la distance à l'épicentre (en km) et "the constant P takes a value of 0 for mean values and 1 for 84-percentiles values of $\log(a)$ " [Ambraseys *et al.*, 1996, p. 377].

Cette étape permet de connaître une valeur estimée de l'accélération en un point d'observation. A présent, c'est l'aléa technologique qui va être étudié.

2.2 Caractérisation de l'aléa technologique

Il existe diverses manières d'évaluer l'aléa technologique. Le choix de la méthode varie selon l'échelle de l'étude (nationale, régionale ou urbaine) et est tributaire des données disponibles ou que l'on peut envisager d'acquérir. Parmi ces méthodes, nous avons retenu trois exemples. Le travail de S. Glatron [Glatron, 1997] aborde les risques technologiques - et plus précisément les risques-sites et risques-transport d'hydrocarbures - à partir d'un modèle quantitatif déterministe inspiré des études de danger. Comme le souligne l'auteur, une des limites de ce modèle provient de la masse de données nécessaires à sa mise en œuvre, ainsi que des marges d'erreurs qu'il faudrait évaluer. La méthode présentée par E. Propeck-Zimmermann *et al.* [Propeck-Zimmermann *et al.*, 2002] est basée sur les zonages PPI et prend en compte l'aspect cumulatif, sans pour autant intégrer la transition graduelle dans le zonage PPI. Enfin, l'article de J. Tixier *et al.* [Tixier *et al.*, 2002] reprend différentes méthodes d'analyse des risques industriels. Il souligne que les méthodes déterministes (fondées sur l'évaluation des conséquences de l'accident) nécessitent de nombreuses

²⁰Peak ground acceleration.

données relatives à la nature des produits, aux volumes, aux procédés industriels, etc., données dont nous ne disposons pas. Les modèles probabilistes sont fondés sur les probabilités d'occurrence d'un accident et sont souvent appliqués à grande échelle spatiale (échelle du site industriel) ; ils ne sont donc pas compatibles avec notre étude, étant donné que nous travaillons à l'échelle de l'agglomération.

Évaluer l'aléa technologique comme l'ont fait S. Glatron [Glatron, 1997], J. Tixier *et al.* [Tixier *et al.*, 2002] et bien d'autres, le caractériser et le localiser requiert d'avoir accès à des données suffisamment précises (quantités de produits stockées, configuration du lieu de stockage, rose des vents, prise en compte des effets barrières²¹, probabilité d'occurrence des scénarios envisagés... , autant de données peu diffusées par les industriels pour des raisons de sécurité) et à des modèles permettant de simuler un accident à partir des données collectées. Dans notre cas, nous n'avons pas eu accès à des données aussi précises et aussi riches et nous avons dû nous contenter de celles fournies par les PPI et par des extraits des études de danger, à savoir la localisation du point source²² de chaque scénario d'accident (le nom de l'atelier où sont stockées, manipulées ou fabriquées les substances dangereuses), la distance des effets redoutés (en mètres)²³, le type d'effets redoutés.

Dans le domaine des risques technologiques, trois types d'effets redoutés peuvent être identifiés [DPPR-MEDD *et al.*, 2005] :

- **thermique** : feux de nappe (liquide), feux de torches (gaz ou liquide), feux de solides (produits solides combustibles), Boil Over²⁴, BLEVE²⁵, explosion de gaz ;
- **toxique** : rejet de produit liquide avec vaporisation du jet liquide et évaporation de flaque, rejet de produit gazeux, rejet de gaz liquéfié, incendie avec décomposition de produits toxiques ; les effets toxiques regroupent des processus différents selon le type de milieu dans lequel se produit le rejet (air, eau, sol) ;
- **surpression** : éclatement de bac (libération d'énergie pneumatique), VCE²⁶ (combustion de gaz, de vapeurs), BLEVE (combustion de gaz), explosion de nitrate d'ammonium (décomposition de substances explosives).

Nous avons décidé de caractériser l'exposition plus que l'aléa, donc sans prendre en compte les probabilités d'occurrence des accidents, n'ayant pas accès à de telles données. Dans ce contexte, nous nous sommes inspirée de la méthode proposée par E. Propeck-Zimmermann *et al.* [Propeck-Zimmermann *et al.*, 2002], afin de représenter le cumul des expositions aux

²¹Effets barrières : atténuation des effets d'un accident (incendie, explosion...) en raison de la présence d'obstacles naturels ou artificiels, mis en place délibérément ou non par l'industriel et permettant de diminuer les conséquences de l'accident. Il peut s'agir d'une rangée d'arbres, d'un mur, etc.

²²Point source : réservoir, cuve, fût... qui contient la(les) substance(s) dangereuse(s) et qui sera le point de départ d'un accident.

²³La distance indiquée par l'étude de danger définit la zone d'effets irréversibles, également appelée ZOLERI ou Z2. Lorsque le point source est un point (ou un bâtiment suffisamment petit pour être considéré comme un point), la zone d'effets redoutés correspond à un cercle, dont le rayon est égal à la "distance des effets redoutés". Lorsque le point source est un polygone (emprise ferroviaire par exemple), la zone d'effets redoutés correspond à une zone tampon autour du polygone. Elle inclut également le polygone point source.

²⁴"Boule de feu accompagnée de projection de liquide enflammé" [DPPR-MEDD *et al.*, 2005].

²⁵"Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion, vaporisation explosive d'un liquide porté à ébullition (...) qui se produit lorsqu'un réservoir contenant un gaz inflammable est porté à haute température. La partie liquide entre en ébullition puis se vaporise instantanément en faisant exploser le réservoir qui le contient. Le gaz ainsi libéré s'enflamme, créant une énorme boule de feu" [DPPR-MEDD *et al.*, 2005]. Pour cette raison, un BLEVE appartient à la catégorie des effets redoutés thermiques et à celle des effets de surpression.

²⁶"Mécanismes d'une explosion de gaz et (ou) vapeurs combustibles" [DPPR-MEDD *et al.*, 2005].

sites technologiques dangereux, tout en souhaitant améliorer cette méthode, notamment en intégrant un gradient des effets avec la distance. Plutôt que de parler de “cercle d’effets”, nous emploierons le terme d’“enveloppe” pour désigner l’extension spatiale des effets redoutés d’un accident potentiel, car certains scénarios ne sont pas définis à partir d’un point mais d’une emprise (c’est notamment le cas d’une emprise ferroviaire). Dans le cas de l’effet toxique, on peut considérer l’enveloppe comme une demi-sphère, prenant en compte les trois dimensions de l’espace.

2.2.1 Exposition cumulée

Comme nous l’avons précisé dans le premier chapitre, le terme d’exposition est généralement approprié lorsque l’on parle des hommes, des bâtiments, des infrastructures bâties de manière générale, mais pas pour les espaces ouverts, non bâtis. Rappelons que nous étendons, pour ce travail, la notion d’exposition à cette deuxième catégorie d’espace car nous ne souhaitons pas uniquement faire un état des lieux de la manière dont les infrastructures humaines et les habitants peuvent être exposés, mais également localiser les espaces d’exposition cumulée où il serait nécessaire de réfléchir à l’occupation et à l’utilisation du sol. L’objectif est bien de ne pas se restreindre à une description de l’état actuel de la situation, mais de réfléchir en termes d’aménagement urbain.

Les informations fournies par le PPI ne concernent que le scénario potentiel majorant, dont l’extension spatiale des effets est la plus importante. L’étude de danger recense, au contraire, l’ensemble des scénarios d’accident susceptibles de se produire sur un site technologique donné, quelle que soit leur gravité. C’est cette dernière information qu’il nous a semblé pertinent d’intégrer, afin de pouvoir signifier des éventuels cumuls au sein d’une même entreprise.

Nous représentons deux sortes de cumuls : le premier concerne le cumul de plusieurs scénarios extraits des études de danger de diverses entreprises, le second se rapporte aux différents scénarios d’une même entreprise. En effet, il nous a paru important de traiter le cas où une entreprise peut générer des effets de nature différente et où la menace représentée par un site, sur lequel - par exemple - un incendie et une explosion peuvent se produire, est supérieure à celle d’un site concerné uniquement par le seul incendie. La notion de “cumul” révèle le besoin de qualifier qu’un individu ou un bâtiment localisé dans un secteur où plusieurs enveloppes se superposent est davantage exposé qu’un individu ou un bâtiment “localisé” dans une seule enveloppe. Cette affirmation n’est plus valable à partir du moment où des probabilités d’occurrence des accidents sont prises en compte²⁷. En effet, un individu exposé à un accident dont la probabilité d’occurrence est de $1/10^2$ est davantage en danger qu’un individu exposé à deux accidents de probabilités d’occurrence égales à $1/10^6$ et $1/10^8$.

Les cumuls peuvent être de deux natures différentes : quantitatifs ou qualitatifs.

Un **cumul quantitatif** correspond à un comptage des enveloppes qui se superposent [Propeck-Zimmerann *et al.*, 2002]. Par exemple, la figure 2.11 permet d’identifier que l’ouest de la zone étudiée est davantage exposé (zone où quatre enveloppes sont superposées) que la partie est (une seule enveloppe).

²⁷Les probabilités d’occurrence d’accidents technologiques peuvent être estimées par l’intermédiaire de méthodes qualitatives, semi-quantitatives ou quantitatives, lorsque le retour d’expérience le permet [DPPR-MEDD *et al.*, 2005].

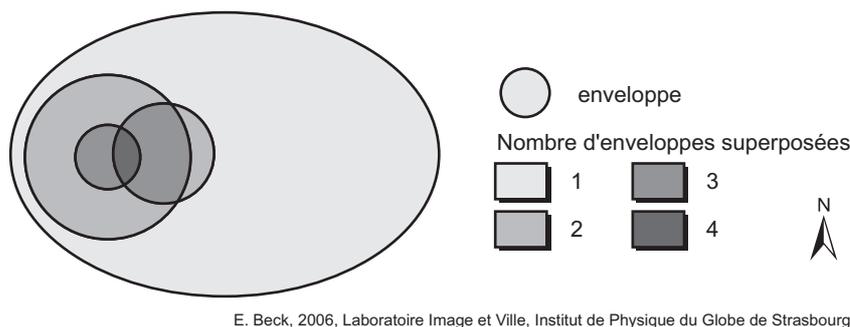


FIG. 2.11 – Exemple théorique de cumul quantitatif : superposition de plusieurs enveloppes. A l'est, le cumul est faible (une enveloppe), alors qu'il est élevé dans le secteur ouest (jusqu'à quatre enveloppes superposées).

L'évaluation de l'aléa technologique (ou l'exposition) est basée sur le cumul quantitatif, puisque nous considérons que l'aléa est élevé lorsque plusieurs enveloppes se superposent, faible dans le cas d'une seule enveloppe. Nous avons retenu quatre niveaux d'aléa : faible, faible à moyen, moyen à élevé, élevé. La relation entre le niveau d'aléa et le nombre d'enveloppes superposées dépend de la zone étudiée (dans certains cas, on peut rencontrer jusqu'à 22 enveloppes superposées ; Propeck-Zimmermann *et al.*, 2002).

Un **cumul qualitatif** représentera les types d'effets redoutés que l'on pourra rencontrer en cas de superposition de plusieurs enveloppes (toxique-thermique, toxique-surpression, seulement thermique...). Sur la figure 2.12, la zone centrale correspondant à l'intersection des deux enveloppes est caractérisée par un effet thermique **et** un effet redouté toxique, alors que les extrémités ouest et est sont concernées respectivement par un scénario thermique et un scénario toxique. Un avantage de l'identification des cumuls qualitatifs réside dans le fait que la prévention peut être davantage ciblée. Par exemple, un bâtiment exposé aux effets toxique **et** thermique pourrait être construit selon des normes définies, normes qui seraient différentes s'il était situé dans un secteur où seuls des effets toxiques seraient potentiels.

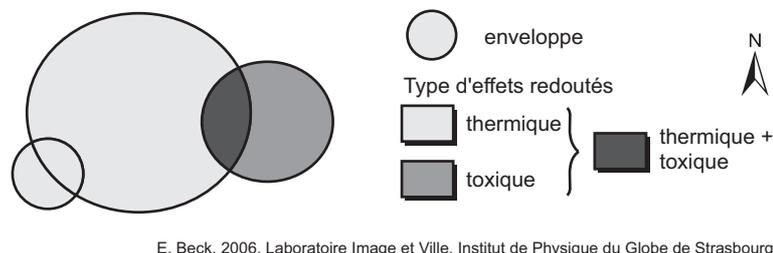


FIG. 2.12 – Exemple théorique de cumul qualitatif : superposition d'une enveloppe "toxique" et d'une enveloppe "thermique". Certains secteurs sont exposés aux effets thermiques uniquement (à l'ouest), d'autres à une combinaison toxique-thermique (au centre).

Cette première analyse permet d'identifier l'exposition cumulée, quantitative ou qualitative, à laquelle une population, un bâtiment, un espace ouvert sont exposés. Néanmoins, cette analyse cumulée de l'exposition ne prend pas en compte des différenciations au sein d'une même enveloppe. C'est pourquoi nous allons tenter d'intégrer un gradient des effets avec la distance au point source.

2.2.2 Scénarios et réactions en chaîne

Sur la base des enveloppes, en fonction des scénarios fournis par les études de danger, on peut être en mesure d'imaginer des réactions en chaîne. Cette approche consiste en une analyse spatiale basée sur la localisation des points sources par rapport à l'aire des différentes enveloppes. Cet aspect sera développé au paragraphe 2.4.3.2.

2.2.3 Intégration d'un gradient d'effets avec la distance au point source

L'inconvénient des enveloppes est qu'elles sont destinées à élaborer les PPI et donc délimiter des zones de gestion des secours et de prévention par l'information de la population. Ainsi, toutes les personnes et tous les bâtiments intégrés dans ce périmètre sont soumis aux mêmes règles sans qu'aucune distinction ne soit faite (cas a, fig. 2.13) : les individus A et B sont exposés aux mêmes effets, quantitativement parlant ; ils bénéficient de la même information.

Et pourtant, ce n'est pas le cas en termes d'exposition, puisque les effets d'un accident ne sont pas les mêmes à proximité du point source et aux limites de l'enveloppe. On peut extrapoler en disant que l'exposition aux sources de danger technologique n'est pas comparable à proximité du centre du cercle et sur son périmètre (cas b, fig. 2.13) : l'individu A, localisé à proximité du point source de danger, est davantage exposé que l'individu B, situé quasiment à la périphérie de l'enveloppe d'effets redoutés. C'est pourquoi, nous avons souhaité représenter ce gradient d'effets avec la distance au point source, afin d'intégrer des différenciations d'exposition.

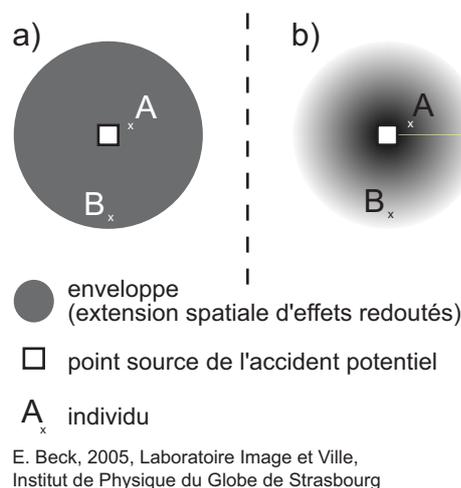


FIG. 2.13 – Gradients des effets en fonction de la distance (schéma théorique). a) Selon la logique d'élaboration des PPI, les individus A et B sont exposés de la même manière au danger. b) Dans la réalité, A, proche de la source, est plus exposé que B, situé aux limites du PPI.

Pour prendre en compte l'atténuation des effets d'un accident technologique suivant la distance, on peut bien entendu les simuler à l'aide de modèles élaborés nécessitant d'avoir accès à des données très précises mais confidentielles pour la plupart. Une autre solution

consiste à modéliser ces effets d'atténuation en se fondant sur des lois simplifiées qui correspondent à des lois d'atténuation. Elles ont le même objectif que les lois d'atténuation des ondes sismiques mais sont appliquées au danger technologique.

La modélisation des effets d'atténuation d'une diffusion de substances toxiques est très complexe car de nombreux paramètres entrent en jeu : milieu dans lequel a lieu la diffusion (air, eau, sol), type de produit, conditions météorologiques, effets barrières... C'est pourquoi nous restreindrons cette étude aux effets thermiques et de surpression. Dans les deux cas, la loi d'atténuation adoptée est celle préconisée par l'INERIS [INERIS, 2002], qui considère que les effets sont décroissants en fonction inverse de la distance au carré (équ. 2.4). Les effets sont matérialisés par une intensité $I(x)$ qui correspond en réalité à une énergie (flux thermique radiatif par exemple) à laquelle est exposé un individu ou un bâtiment localisé au point x .

$$I(x) = \frac{I_0}{d^2(x)} \quad (2.4)$$

avec $I(x)$ l'intensité des effets au point x , I_0 l'intensité au point source, $d(x)$ la distance du point x au point source.

L'intensité des effets décroît avec la distance au carré au point source. En matière d'intensité, ne disposant que de données sur la taille du rayon de l'enveloppe d'effets, nous avons attribué des valeurs d'intensité sans dimension. Cette intensité en un point est fonction de la distance au point source, d'une "loi d'atténuation des effets" définie et d'une intensité au point source I_0 . Cette intensité à la source varie d'un scénario à l'autre, scénarios que l'on peut hiérarchiser. Arbitrairement, nous avons choisi une intensité maximale égale à 1 et avons attribué cette valeur au scénario dont l'enveloppe a le plus grand rayon, pour un type d'effet donné (chaque effet, thermique et de surpression, étant analysé séparément). L'intensité au point source des autres scénarios est attribuée proportionnellement au rayon de l'enveloppe. Par exemple, si deux scénarios sont caractérisés par des rayons d'enveloppe égaux à 500 m et 1 000 m, les intensités au point source seront respectivement égales à 0.5 et 1.

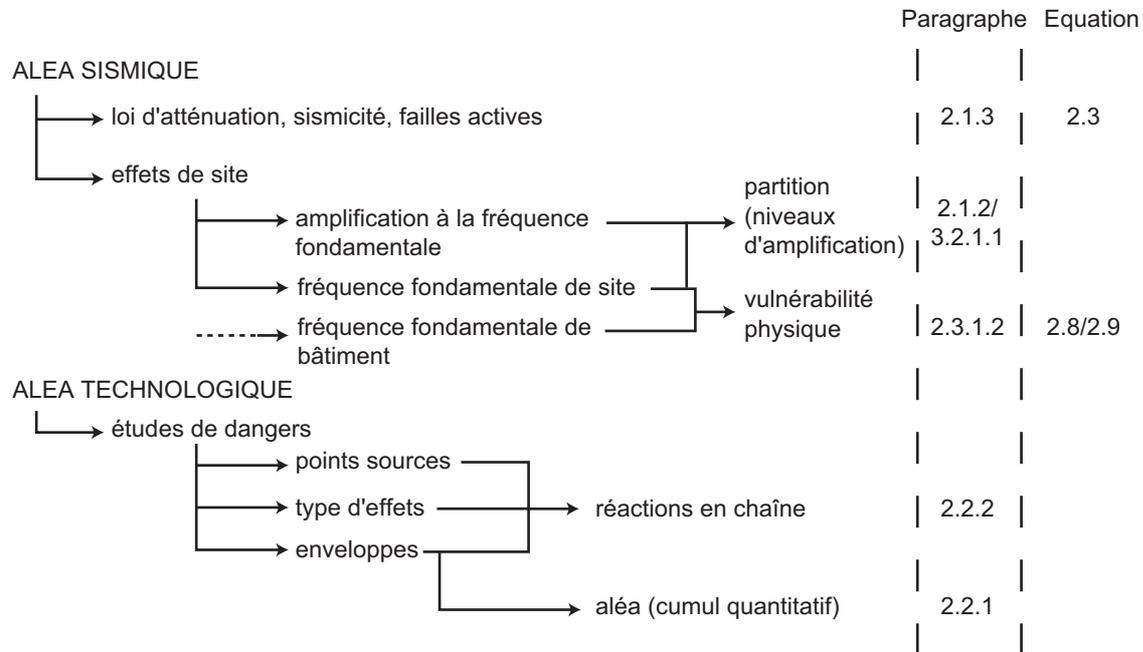
L'intensité est calculée en tous points de l'enveloppe, transformée en grille pour faciliter le calcul des distances dans le SIG. La résolution choisie est liée aux dimensions (longueur, largeur) des bâtiments²⁸ les plus répandues dans l'agglomération. Dans notre cas, la surface de bâtiments la plus répandue est proche de 125 m², ce qui incite à choisir une résolution spatiale de 10 m afin de minimiser le nombre de bâtiments représentés dans un pixel. Dans ce contexte, les scénarios dont le rayon est inférieur ou égal à 10 m ne sont pas considérés.

Cependant, en l'absence de données permettant de définir avec davantage de précision des intensités au point source, ces résultats n'ont que peu de signification. La recherche d'une représentation du gradient des effets avec la distance au point source permettant de s'abstenir d'une modélisation constitue une perspective de travail intéressante.

²⁸Sous-entendu ensemble de bâtiments.

2.2.4 Conclusion : méthodologie d'évaluation des aléas

La méthodologie d'évaluation des aléas peut être synthétisée par la figure 2.14.



E. Beck, 2006, Laboratoire Image et Ville, Institut de Physique du Globe de Strasbourg

FIG. 2.14 – Méthodologie d'évaluation des aléas sismique et technologique. L'évaluation de l'aléa sismique consiste à estimer les effets de site et à simuler un séisme. Les effets de site permettent d'obtenir une carte de fréquences fondamentales de site, qui, comparées aux fréquences fondamentales de bâti, permettent d'appréhender la vulnérabilité physique du bâti. Les fréquences fondamentales de site et les amplifications aboutissent à une partition de l'espace en niveaux d'amplification. Parallèlement, les études de danger fournissent des informations sur les scénarios d'accidents, notamment sur leur point source, le type d'effets et l'extension spatiale de leurs effets (enveloppe). L'analyse spatiale de l'ensemble de ces données permet d'appréhender les réactions en chaîne potentielles, tandis que la superposition des enveloppes informe sur le niveau d'aléa.

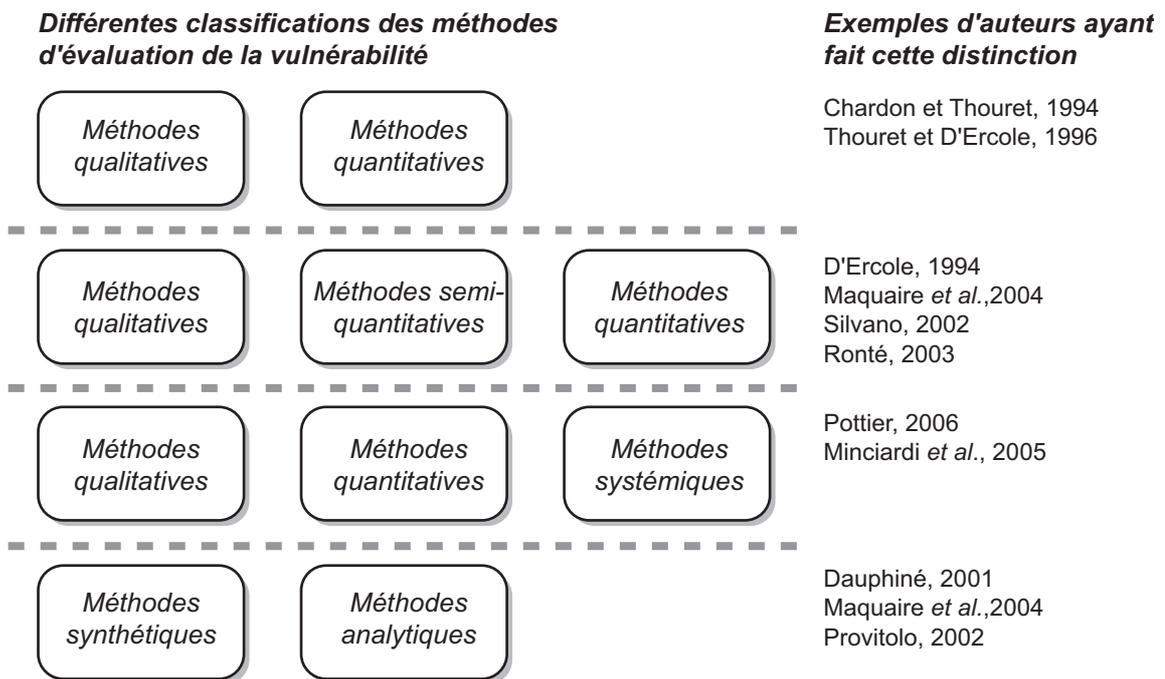
A présent que les aléas sismique et technologiques sont caractérisés, l'analyse des risques se poursuit par l'étude de la vulnérabilité des éléments exposés.

2.3 Caractérisation de la vulnérabilité des éléments exposés

La prise en compte des éléments exposés à un risque est primordiale dans l'étude dudit risque, qu'il soit naturel ou technologique. La caractérisation de ces éléments passe avant tout par leur inventaire. On peut distinguer cinq catégories d'éléments exposés : le bâti et les différentes infrastructures, les réseaux et les flux associés, la population, les activités humaines et enfin l'environnement. Caractériser les éléments exposés permet d'introduire la notion de vulnérabilité, qui peut être quantifiée dans le cas du bâti, des réseaux et des activités, grâce à l'intégration de valeurs vénales [Léone, 1995]. Pour l'environnement, la

tâche est moins aisée. La vulnérabilité d'une population est liée à un ensemble de facteurs qualitatifs et quantitatifs [D'Ercole, 1996]. Parmi ces facteurs, citons la localisation, notamment la distance aux sources de danger, les variables socio-démographiques, comme l'activité professionnelle, l'âge, etc., et la représentation cognitive du risque.

On l'a vu dans le premier chapitre, il existe différentes définitions de la vulnérabilité des éléments exposés. Elle peut également être évaluée de diverses manières, comme le soulignent les différents auteurs qui s'y sont intéressés. Proposer une typologie simple des démarches d'évaluation de la vulnérabilité n'est pas aisé, tant les définitions évoquées par ces auteurs sont variées. Nous avons cependant tenté d'en faire une synthèse (fig. 2.15).



E. Beck, 2006, Laboratoire Image et Ville, Institut de Physique du Globe de Strasbourg

FIG. 2.15 – Différentes manières de classer les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité.

La manière la plus répandue de classer ces méthodes d'évaluation consiste à opposer les méthodes **quantitatives** aux méthodes **qualitatives**.

Les **démarches quantitatives** (également appelées démarches classiques par J.-C. Thouret et R. D'Ercole [D'Ercole, 1994 ; Thouret et D'Ercole, 1996]) consistent à mesurer l'endommagement potentiel des biens et des personnes et ses répercussions sur l'environnement économique [Thouret et D'Ercole, 1996 ; IMIRILAND, 2003]. C'est dans cette logique économique que s'inscrivent également les méthodes assurantielles, qui consistent à valuer l'ensemble des éléments exposés [Valache, 2003 ; Polère *et al.*, 2004]. Ces méthodes sont difficiles à mettre en place pour des zones d'études étendues, étant donné qu'elles requièrent de nombreuses données qui ne sont pas toujours disponibles [Mejia-Navarro et Garcia, 1996 ; Léone, 1995, *in* Maquaire *et al.*, 2004].

A l'opposé, comme précisé par R. D'Ercole, les **approches qualitatives** "visent à cerner la vulnérabilité à travers les différents facteurs qui tendent à la faire varier" [D'Ercole, 1994, p. 87]. Il conçoit alors la vulnérabilité comme la propension d'une société à subir

des dommages suite à une catastrophe. Les facteurs de vulnérabilité peuvent être socio-économiques, institutionnels, etc. La définition de cette approche qualitative telle qu'elle est donnée par le MATE ²⁹ et le METL ³⁰ pour la prise en compte de la vulnérabilité dans les PPR diffère quelque peu : elle consiste en un recensement des éléments exposés et en une évaluation de leur vulnérabilité par l'intermédiaire d'indices empiriques [MATE et METL, 1999, *in* Maquaire *et al.*, 2004].

Outre cette opposition quantitatif/qualitatif, d'autres nuances peuvent être apportées. Par exemple, R. D'Ercole [D'Ercole, 1994], S. Silvano [Silvano, 2002, *in* Maquaire *et al.*, 2004] et les chercheurs investis dans le programme de recherche IMIRILAND ³¹ [IMIRILAND, 2003] introduisent une méthode intermédiaire, **semi-quantitative**, qui, selon R. D'Ercole, intègre à la fois les facteurs de vulnérabilité et les éléments vulnérables et, selon S. Silvano, permet de pallier les inconvénients des méthodes qualitatives (basées sur la photo-interprétation et donc difficilement applicables à des études à petite échelle) et quantitatives (qui nécessitent de trop nombreuses données). N. Pottier et R. Minciardi *et al.* ajoutent également une troisième classe de méthodes, les **systemiques**, qui possèdent une vision plus large que les deux autres (quantitatives et qualitatives) [Pottier, 2006] car prenant en considération les effets directs et indirects d'une catastrophe sur un système. Selon R. Minciardi *et al.*, la vulnérabilité systémique est la propension d'un élément du territoire à supporter les pertes de fonctionnalités non pas uniquement dues à une atteinte à sa propre vulnérabilité physique mais également par effets dominos [Minciardi *et al.*, 2005]. Elle dépend donc des liens existants entre tous les éléments du système considéré ; cette approche nous semble tout particulièrement adaptée à notre problématique.

Une autre distinction peut être faite entre méthodes **analytiques** et **synthétiques** [Dauphiné, 2001 ; Provitolo, 2002 ; Maquaire *et al.*, 2004]. Les approches **analytiques** expriment les dommages potentiels que subiraient les éléments exposés si un événement catastrophique se produisait (préjudices aux personnes, dommages directs et indirects aux biens, pertes d'exploitation, dégradation du milieu naturel...). Ce sont principalement des méthodes quantitatives [Léone *et al.*, 1995, par exemple]. Dans le cas de la démarche **synthétique**, la vulnérabilité est plus qu'une simple somme des dommages prévisionnels mais "la capacité d'une personne à anticiper, tenir le coup, résister et reconstruire après les impacts provoqués par une catastrophe" [Blaikie *et al.*, 1994, *in* Provitolo, 2002, p. 106] et, plus globalement, exprime la capacité de réponse d'un système à une crise potentielle [D'Ercole, 1994 ; D'Ercole, 1996 ; Dauphiné, 2001].

Retenir une seule et unique méthode d'évaluation de la vulnérabilité de différents éléments exposés peut paraître réducteur si l'on souhaite s'intéresser aux infrastructures et à la population. C'est pourquoi nous avons fait le choix d'employer quatre méthodes différentes : la première porte sur la vulnérabilité sismique du bâti (démarche quantitative), la deuxième sur la vulnérabilité fonctionnelle des infrastructures (approche systémique) et les deux dernières concernent la population, étudiée sous un angle quantitatif pour l'une et qualitatif pour l'autre.

²⁹Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement.

³⁰Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement.

³¹IMIRILAND : impact of large landslides in the mountain environment : identification and mitigation of risk (2001-2003). Programme de recherche européen du 5^e PCRD. Coordinateur scientifique : C. Scavia, Politecnico di Torino.

2.3.1 Évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments

Ce travail de thèse a pour objectif d'étudier les interactions entre risques sismique et technologiques et à identifier les effets dominos (notamment les accidents technologiques) qui pourraient se produire suite à un tremblement de terre. Sachant que les produits dangereux qui peuvent être à l'origine de tels accidents sont généralement stockés dans des bâtiments, une réaction en chaîne consécutive à un séisme peut survenir si les fûts de stockage ou les conduites sont fragilisés ou si les bâtiments dans lesquels ils se trouvent sont endommagés voire détruits. En effet, si les bâtiments et les structures résistent, il est peu probable que des effets dominos soient observés. C'est pourquoi la probabilité de réaction en chaîne est très élevée si les structures où sont stockées les substances dangereuses sont vulnérables face à un séisme. La résistance d'un bâtiment aux secousses sismiques n'est pas le seul paramètre à prendre en compte : la résistance du réservoir dans lequel les substances dangereuses sont stockées ou produites est tout aussi importante, car si le bâtiment s'écroule mais que le réservoir résiste, les réactions en chaîne seront évitées. Cependant, les données décrivant les réservoirs et conduites sont généralement confidentielles, pour des raisons de sécurité, c'est pourquoi nous nous focalisons sur la vulnérabilité des bâtiments.

La vulnérabilité physique d'un bâtiment vis-à-vis d'un séisme peut être déterminée de deux manières : en étant caractérisée selon la classification EMS-98, ou par l'estimation de son potentiel à entrer en résonance.

2.3.1.1 L'EMS-98

L'EMS-98 est une échelle d'intensité macrosismique qui mesure sur une échelle graduée de I à XII (en chiffres romains) la gravité d'un séisme en fonction des effets observés sur les êtres vivants (personnes et animaux), les objets et les bâtiments [Grunthal (dir.), 2001] (cf. annexe 3). Pour déterminer l'intensité d'un séisme, les experts se fondent d'une part sur les témoignages des personnes ayant ressenti le tremblement de terre (témoignages qui sont collectés par l'intermédiaire d'enquêtes individuelles et collectives), d'autre part sur les observations *de visu* des dommages aux bâtiments. Pour pouvoir différencier des zones où les effets sont plus ou moins importants et comprendre les effets d'un séisme sur les bâtiments, il faut préalablement connaître la résistance de ces derniers, car des ondes sismiques d'amplitude et de fréquence identiques n'ont pas les mêmes effets sur une structure en maçonnerie et une structure en béton armé correctement construite (par exemple). C'est pourquoi les experts à l'origine de l'EMS-98 ont mis en place une typologie du bâti simple selon sa résistance, basée principalement sur le type de bâtiment (cf. annexe 3). Comme on peut le constater, il n'existe pas **une** classe de vulnérabilité pour **un** type de bâtiment mais plusieurs classes vraisemblables pour un type donné, avec une incertitude plus ou moins grande.

La typologie du bâti est basée sur un certain nombre de critères : la date de construction, le type de construction, les principaux critères architecturaux (mitoyenneté, nombre d'étages. . . ; Marcot et Arnal, 2004). Attribuer une classe de vulnérabilité à des bâtiments nécessite de connaître ces paramètres pour chacun d'entre eux.

Bien qu'elle soit largement reconnue comme performante, cette méthode de détermination de la vulnérabilité du bâti peut être difficilement mise en place à l'échelle d'une agglomération, car elle requiert des données précises sur le type de bâtiment ou, le cas échéant, une

vaste campagne d'observation, doublée d'une expertise en architecture, ce qui peut s'avérer problématique lorsque plusieurs dizaines de milliers de bâtiments doivent être considérés, étant donné le coût et le temps nécessaires. C'est pourquoi, dans le cadre de ce travail, nous avons choisi une autre méthode.

2.3.1.2 Vulnérabilité physique aux tremblements de terre liée à la fréquence de résonance

Un bâtiment, tout comme un site (au sens géologique du terme), est caractérisé par une fréquence de résonance qui dépend de sa hauteur, de son matériau de construction et de sa structure (présence de contreventements, type d'ossature...).

La méthode que nous proposons ici part du principe suivant : si la fréquence fondamentale d'un bâtiment est égale ou proche de la fréquence fondamentale de résonance du site sur lequel il a été construit, le risque pour le bâtiment est alors maximum car il a une probabilité élevée d'entrer en résonance en cas de séisme [Betbeder-Matibet, 2003 ; Widmer *et al.*, 2003]. Lorsqu'un bâtiment entre en résonance avec le sol sous l'effet de l'excitation d'ondes sismiques, il subit des déformations importantes dues à l'amplification et à la fréquence des ondes transmises par le sol et qui peuvent l'amener à s'effondrer.

La résistance d'un bâtiment à un tremblement de terre n'est pas uniquement liée à son potentiel d'entrer en résonance : l'accélération des ondes, les effets de site et la concordance entre la fréquence des ondes et celle du bâtiment sont d'autres paramètres à prendre en compte.

Si l'accélération n'est pas élevée, bien que le bâtiment soit caractérisé par une fréquence fondamentale similaire à celle du site, cela ne signifie pas nécessairement qu'il sera détruit. Inversement, même si le potentiel d'entrer en résonance d'un bâtiment est faible, si l'accélération est très élevée (proche de 1 g ³²), il sera tout de même détruit. La réaction d'un bâtiment à une accélération dépend de sa localisation, de sa structure, de son matériau de construction et de sa qualité. Des fonctions d'impact permettent de mettre en relation la probabilité d'endommagement d'un type de bâtiment donné selon l'accélération qu'il subit. Par exemple, un bâtiment de type D, selon la classification EMS-98, soumis à une accélération de 0.41 g (4.1 m.s^{-2}) aura 40 % de chances d'être endommagé de façon modérée (niveau de dommages D2, toujours selon l'échelle macrosismique européenne) [Marcot et Arnal, 2004]. Une typologie du bâti selon les EMS-98 est cependant nécessaire à la mise en place d'une telle démarche.

Si l'amplification à la fréquence fondamentale du site est élevée, autrement dit si des effets de site sont observés, il existe une amplification des ondes pour cette fréquence. Les effets de site constituent un autre paramètre important dans la détermination du devenir d'un bâtiment en cas de séisme important.

Enfin, s'il y a concordance entre la fréquence des ondes destructrices et celle du bâtiment, on peut dans ce cas craindre une entrée en résonance du bâtiment et son effondrement [Ressources naturelles Canada, 2006]. Toutefois, dans le cadre de ce travail, nous nous focaliserons sur l'étude de la fréquence fondamentale du bâtiment.

³²L'accélération des ondes est mesurée en m.s^{-2} mais est souvent exprimée par rapport à l'accélération moyenne de la gravité sur terre ($1\text{ g} = 9.81\text{ m.s}^{-2}$ soit $1\text{ g} \simeq 10\text{ m.s}^{-2}$).

Nous considérons que plus la différence entre la fréquence fondamentale du bâtiment et celle du site est faible, plus le bâtiment est vulnérable. Ainsi, il est nécessaire d'estimer la fréquence fondamentale du bâtiment : plusieurs méthodes le permettent.

– **Estimation de la fréquence fondamentale d'un bâtiment à partir de la méthode H/V ou à l'aide de tables vibrantes : estimation par la mesure**

La première est basée sur la méthode de Nakamura. Elle nécessite la mise en œuvre d'une campagne de mesures afin de déterminer, pour chaque bâtiment existant, sa fréquence fondamentale à partir d'enregistrements réalisés à l'intérieur du bâtiment [Gallipoli *et al.*, 2004 ; Milutinovic *et al.*, 2004].

Une autre méthode, toujours basée sur la mesure, consiste à construire des modèles réduits de bâtiments et à tester leur comportement sur des tables vibrantes [Widmer *et al.*, 2003].

Ces méthodes sont inapplicables telles quelles à l'échelle d'une agglomération, même si on peut envisager de procéder à quelques mesures sur des bâtiments types et de généraliser les valeurs obtenues à des groupes de bâtiments aux caractéristiques homogènes.

Par contre, la méthode H/V peut être mise en place pour des bâtiments particuliers pour lesquels il est primordial de connaître leur potentiel à entrer en résonance, en raison de leur valeur historique et culturelle, par exemple la cathédrale de Cologne [Fäcke *et al.*, 2006] ou la Tour de Pise [Nakamura *et al.*, 1999] ou en raison des conséquences que leur destruction pourrait générer, comme c'est le cas pour les barrages [Castro *et al.*, 1998].

– **Estimation de la fréquence fondamentale en fonction du type de bâtiment et de ses dimensions : estimation par un modèle simplifié**

Cette méthode est un peu plus complexe et dépend de la structure du bâtiment. Elle est calculée à partir d'un modèle simplifié, qui tient compte de plusieurs paramètres, à savoir la hauteur du bâtiment, ses dimensions (largeur et longueur) et le type de bâtiment. Selon le mode de construction, la réponse du bâtiment n'est pas la même [AFNOR, 1995].

Pour les ossatures non bloquées par un remplissage (par exemple un hall de stockage) ou pour un bâtiment en maçonnerie, la formule simplifiée est la suivante (équ. 2.5 ; AFNOR, 1995) :

$$f_{0B} = 10 \frac{\sqrt{L}}{H} \tag{2.5}$$

avec f_{0B} la fréquence fondamentale du bâtiment, L la dimension (largeur ou longueur) du bâtiment (en mètres), H la hauteur du bâtiment (en mètres).

Pour les contreventements par voiles de béton armé et/ou chaînés ou contreventements mixtes, qui correspondent à la majorité des bâtiments construits depuis 30-40 ans, la formule est la suivante (équ. 2.6 ; AFNOR, 1995) :

$$f_{0B} = 12.5 \frac{\sqrt{L}}{H} \sqrt{\frac{L+H}{H}} \quad (2.6)$$

Enfin, pour les ossatures avec remplissage en maçonnerie et d'une manière générale les bâtiments anciens, la fréquence fondamentale du bâtiment peut être calculée par la formule (équ. 2.7 ; AFNOR, 1995) :

$$f_{0B} = \frac{\sqrt{L}}{0.06H} \sqrt{\frac{2L+H}{H}} \quad (2.7)$$

Pour chacune de ces trois formules, la fréquence fondamentale doit être calculée pour les deux dimensions du bâtiment, à savoir la longueur et la largeur. Chaque bâtiment est alors caractérisé par deux fréquences fondamentales. En définitive, ces formules simplifiées permettent d'avoir une estimation de la fréquence fondamentale du bâti à partir du moment où l'on peut identifier les trois catégories de bâtiments et connaître leurs trois dimensions (hauteur, largeur, longueur). Elles s'appliquent bâtiment par bâtiment et non pas à un groupement de bâtiments mitoyens, dont les dimensions sont alors différentes. Partant du fait que nous disposons de données de hauteur à l'échelle du groupement de bâtiments mitoyens, que nous n'avons pas connaissance des catégories de bâtiments et que nous ne disposons pas des données de longueur et largeur, il ne nous est pas possible d'avoir recours à ces formules pour calculer la fréquence fondamentale du bâti.

– Indication approximative de la fréquence fondamentale : formule empirique

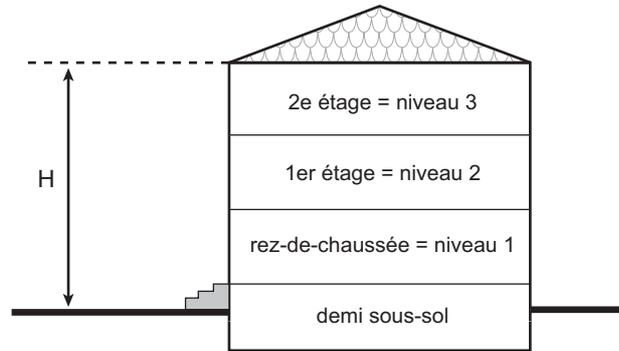
Cette dernière méthode est fondée sur le principe du pendule, selon lequel la période d'oscillation ou sa fréquence ne sont pas dépendantes de sa masse ou de la vitesse d'oscillation mais uniquement de sa longueur. Pour les bâtiments, le principe est plus ou moins le même, ils oscillent à des fréquences qui sont fonction de leur hauteur. M. R. Gallipoli *et al.* ont montré que les fréquences mesurées à l'aide de la méthode H/V de bruit varient linéairement en fonction de la hauteur [Gallipoli *et al.*, 2004]. Ainsi, une formule empirique (équ. 2.8) permet de calculer très approximativement la fréquence fondamentale d'un bâtiment [Madariaga et Perrier, 1991 ; Ressources naturelles Canada, 2006]. Les valeurs obtenues ne donnent ici qu'une indication sur la fréquence d'oscillation du bâtiment ; il est primordial d'en tenir compte.

$$f_{0B} = \frac{10}{n} \quad (2.8)$$

avec f_{0B} la fréquence fondamentale du bâti et n le nombre d'étages.

Les autres méthodes ayant été écartées en raison du manque de données et de notre échelle d'étude (l'agglomération), nous retenons cette dernière formule malgré son défaut majeur, à savoir sa grande approximation.

Disposant de données de hauteur de bâtiment et non de leur nombre d'étages, nous faisons l'hypothèse qu'un étage moyen (plancher compris) mesure 2.70 m³³. La hauteur au chéneau H d'un bâtiment comprend les différents niveaux³⁴ et éventuellement un demi-niveau (demi sous-sol) si le rez-de-chaussée est légèrement surélevé (fig. 2.16). On peut ainsi déduire le nombre de niveaux en divisant la hauteur d'un bâtiment par 2.7 et en ne conservant que la partie entière du résultat.



E. Beck, 2006, Laboratoire Image et Ville, Institut de Physique du Globe de Strasbourg

FIG. 2.16 – Schéma théorique d'un bâtiment.

La vulnérabilité d'un bâtiment ne dépend pas uniquement de sa fréquence fondamentale propre et donc de son comportement individuel. En effet, au cours d'un séisme, le comportement d'un bâtiment va dépendre de ses caractéristiques propres mais aussi de celles des immeubles mitoyens, puisqu'au sein d'un pâté de maisons on peut observer un comportement d'ensemble [Royet, 2006]. Par ailleurs, la couche de bâti de la BD Topo® correspond à une généralisation des bâtiments et à une agrégation de ceux-ci en un ensemble de bâtiments mitoyens. Chaque groupe de bâtiments est doté d'une seule valeur de hauteur. C'est pourquoi, nous calculerons une valeur de fréquence fondamentale de bâti à l'échelle de l'ensemble de bâtiments mitoyens, excepté pour les groupes de bâtiments de hauteur strictement inférieure à 3 m.

Ainsi, on peut procéder au calcul de la fréquence fondamentale de bâti à partir de l'équation 2.8 et de la hauteur moyenne d'un ensemble de bâtiments mitoyens donné (équ. 2.9) :

$$f_{0B} = \frac{10}{E\left(\frac{H}{2.7}\right)} \quad (2.9)$$

avec f_{0B} la fréquence fondamentale du bâti et H la hauteur moyenne de l'ensemble de bâtiments mitoyens (en mètres).

L'analyse de corrélation entre les fréquences fondamentales de site et de bâtiment est l'étape essentielle à la définition de la vulnérabilité des bâtiments : plus ces valeurs sont proches, plus le bâtiment est susceptible d'entrer en résonance. La couche des fréquences fondamentales de site interpolées est utilisée pour attribuer à chaque bâtiment une fréquence de site. La différence entre les deux fréquences est ensuite analysée (plus la différence est faible, plus le bâtiment est vulnérable et susceptible d'entrer en résonance).

³³Source : L. Modzinski, ingénieur du bâtiment, communication personnelle, 2006.

³⁴Nous préférons le terme de "niveau" à celui d'"étage" car le rez-de-chaussée est compris dans la hauteur d'un bâtiment.

Nous avons conscience des limites introduites par cette méthode. Aussi, nous considérons que le potentiel d'entrer en résonance obtenu dans la présente étude ne donne qu'une indication des bâtiments pour lesquels une étude plus approfondie serait nécessaire, notamment à l'aide de méthodes de calcul utilisées dans le génie civil, dans le cadre d'une approche à l'échelle micro.

Seuls les bâtiments localisés au sein de la zone d'étude des effets de site ont fait l'objet d'une comparaison entre leur fréquence fondamentale de bâti et celle du site.

En résumé, nous proposons ici d'évaluer la vulnérabilité physique du bâti en estimant la fréquence fondamentale de chaque ensemble de bâtiments mitoyens, à partir d'une formule empirique et de la hauteur moyenne de chaque ensemble, puis d'analyser la différence entre la fréquence de bâti (f_{0B}) et celle de site (f_0). Cependant, nous ne pouvons nous satisfaire de cette seule caractérisation pour définir la vulnérabilité d'un bâtiment ou d'un ensemble de bâtiments, car celle-ci dépend également de sa fonction.

2.3.2 Caractérisation de la vulnérabilité fonctionnelle des infrastructures

“Les représentations systémiques de la ville permettent de concevoir la ville comme une globalité composée d'éléments interdépendants et en relation avec son environnement” [Baumont et Huriot, 1996, p. 26]. La ville en tant que regroupement de bâtiments, de personnes, d'activités est donc un système dont le fonctionnement est lié à des flux et des interactions entre l'ensemble des éléments la composant.

C'est sur cette définition de la ville que nous nous appuyons pour définir la vulnérabilité fonctionnelle des infrastructures urbaines et adopter une démarche systémique comme celle définie par N. Pottier et R. Minciardi *et al.* [Pottier, 2006 ; Minciardi *et al.*, 2005]. Si l'un des éléments du système que constitue la ville est touché par une catastrophe, le fonctionnement d'un quartier voire de la ville entière peut être perturbé. Par exemple, les interventions des pompiers lors du séisme de Bam (26 décembre 2003, $M_W^{35} = 6.5$) ont été limitées par l'incapacité d'utiliser leurs camions, détruits par les effondrements des bâtiments voisins (fig. 2.17). Certains éléments du système “ville” ont un rôle plus important que d'autres dans son fonctionnement, y compris au cours d'une crise. L'importance de la fonction peut être considérée comme un facteur de vulnérabilité car, si un élément clé dans le fonctionnement d'une ville et plus spécifiquement dans la gestion d'une crise est touché par une catastrophe, les conséquences de sa destruction ou de son incapacité de jouer son rôle seront importantes.

La vulnérabilité fonctionnelle d'une infrastructure varie selon sa fonction et la population qu'il accueille (sensibilité et effectifs de cette population). Ici, le terme “fonction” est utilisé pour qualifier l'utilisation principale d'un bâtiment : par exemple, la fonction d'un immeuble composé d'appartements est résidentielle, celle d'un supermarché est commerciale.

Deux catégories d'infrastructures peuvent être identifiées : les bâtiments et les surfaces non constructibles. Leur rôle dans la gestion d'une crise, d'une part, et les dommages qu'elles subissent, d'autre part, sont différents.

³⁵ M_W : magnitude d'énergie.



FIG. 2.17 – *Camions de pompiers détruits lors du séisme de Bam (26 décembre 2003, $M_W = 6.5$; source : Th. Winter, BRGM). Si un élément clé dans la gestion d’une crise (comme une caserne de pompiers) est touché par une catastrophe, les conséquences de son incapacité de jouer son rôle seront importantes.*

Un certain nombre de facteurs entrent en jeu dans la définition de la vulnérabilité fonctionnelle d’un bâtiment. Nous nous sommes intéressée à trois typologies, celle proposée par C. Hiegel dans sa thèse [Hiegel, 2003], celle élaborée dans le cadre du programme ALARM³⁶ et la classification du bâti pour l’application des normes parasismiques. Ces trois propositions nous serviront de base de réflexion pour l’élaboration d’une typologie adaptée à nos données et à notre échelle d’étude.

C. Hiegel identifie plusieurs cibles³⁷ exposées à l’aléa, à savoir le bâti, la population, les activités économiques et les réseaux de communication [Hiegel, 2003]. Concernant le bâti, elle propose de collecter un certain nombre de données correspondant à des facteurs de vulnérabilité : fonction, âge (pour signifier la qualité du bâtiment³⁸), nombre de ménages, nombre d’étages (pour indiquer la hauteur).

Les facteurs de vulnérabilité identifiés par C. Hiegel sont intéressants mais méritent d’être modifiés et adaptés à notre étude. En effet, son échelle de travail est différente de la nôtre, puisqu’elle se concentre sur les bâtiments environnant les stations de distribution de carburant : il s’agit d’une échelle d’analyse relativement fine, ce qui explique qu’elle atteigne un niveau de détail assez élevé pour décrire le bâti.

Concernant la vulnérabilité fonctionnelle du bâti, C. Hiegel considère les fonctions résidentielle, industrielle, commerciale, tertiaire, artisanale. Sa classification des activités est quelque peu plus détaillée : elle distingue les commerces, les lieux de culte, l’enseignement, la restauration, les activités sportives, administratives, industrielles, artisanales et les autres activités. La fonction et le type d’activité se croisent (fonction commerciale et

³⁶5e PCRD - Programme européen n°EVG1-2001-3018, “Assessment of landslide risk and mitigation in mountain areas” (2001-2004). Coordinateur scientifique : S. Silvano, CNR-URPI, Padova, Italie.

³⁷Le terme de “cible” employé par C. Hiegel rejoint celui d’“élément exposé” ou “élément vulnérable” tel que nous l’utilisons dans le cadre de cette thèse.

³⁸Selon nous, l’âge du bâtiment donne davantage une information sur le mode de construction et ne peut être directement corrélé avec la qualité de ce bâtiment.

activités de commerce) et il nous semble qu'un seul attribut ³⁹ suffirait à définir la fonction d'un bâtiment. Selon nous, ces deux classifications sont incomplètes si l'on souhaite pouvoir identifier clairement certaines catégories de bâtiments dont les fonctions sont particulièrement importantes dans la gestion d'une crise (instances dirigeantes, services de secours, etc.).

Pour les activités, elle ajoute qu'il faut préciser la capacité d'accueil et si l'activité est susceptible de présenter des dangers pour l'environnement. Cela revient à connaître la capacité d'accueil des ERP et identifier les ICPE, ce qui est intéressant par rapport à notre problématique.

C. Hiegel propose également de distinguer plusieurs types de population selon leur sensibilité, de différencier les hôpitaux, les maisons de retraite, les écoles et les crèches et de quantifier la population résidante et la population active, celle présente de jour et celle de nuit. D'après nous, il faut également y adjoindre la population carcérale et la population de transit (hôtels).

D'après les travaux réalisés dans le cadre du programme ALARM, plusieurs facteurs ont été considérés (cf. annexe 4). La typologie de fonction des infrastructures (constructions et terrains aménagés) est intéressante, bien qu'adaptée à un site d'étude particulier, le milieu montagnard. Ceci explique notamment l'apparition de la modalité "pistes de ski" dans les terrains aménagés. Elle est par ailleurs trop détaillée par rapport à notre échelle d'étude et il ne nous est pas possible de l'appliquer, en raison de la difficulté de collecter l'ensemble des données requises pour près de 35 000 bâtiments.

L'application des normes parasismiques est guidée par une typologie du bâti, définie par le décret n°91-461 du 14 mai 1991 relatif à la prévention du risque sismique. En effet, les normes de construction parasismique ne sont pas les mêmes suivant l'aléa (la zone du zonage sismique français dans laquelle se trouve la commune considérée) et la vulnérabilité du bâtiment (la classe de bâti suivant la typologie du tableau 2.2). Cette classification propose d'identifier les bâtiments selon leur type et leur fonction. Elle prend réellement en compte la vulnérabilité fonctionnelle d'une infrastructure, puisqu'elle considère les conséquences de la défaillance d'un ouvrage suite à un séisme. Cependant, elle est peu détaillée et il nous semble important de pouvoir distinguer, au sein de la classe C ⁴⁰ par exemple, les établissements d'enseignement des autres ERP, étant donné la fragilité de certaines populations (établissements d'enseignement primaire par exemple).

Bien que la typologie du décret soit simple au final (quatre classes), elle implique de connaître le type et la fonction des bâtiments avec une grande précision et de disposer d'une base de données attributaires relativement riche.

Finalement, nous avons retenu de ces diverses typologies un certain nombre de facteurs qui influencent la vulnérabilité fonctionnelle d'un bâtiment : la fonction principale, le fait d'être un ERP, la capacité d'accueil de ces derniers et les immeubles de grande hauteur (IGH). Nous allons décrire à présent ces différents paramètres.

³⁹Un objet est décrit par plusieurs *attributs* (pour un bâtiment : fonction, commune de rattachement, nombre de niveaux...). Chacun de ces attributs peut prendre un certain nombre de valeurs, appelées *modalités* (par exemple, pour la fonction du bâtiment : commerciale, résidentielle, industrielle...).

⁴⁰La classe C regroupe les ouvrages représentant un risque élevé du fait de leur fréquentation ou leur importance socio-économique : établissements d'enseignement, stades, salles de spectacles, musées et tous les autres établissements recevant du public.

Type d'ouvrages	Ouvrages "à risque normal"				Ouvrages "à risque spécial"
Classe	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D	
Définition de la classe	Ouvrages dont la défaillance ne représente qu'un risque minime pour les personnes et l'économie	Ouvrages et installations offrant un risque dit "normal" pour la population	Ouvrages représentant un risque élevé du fait de leur fréquentation ou leur importance socio-économique	Ouvrages et installations dont la sécurité est primordiale pour les besoins de la protection civile et la survie de la région	Ouvrage dont la destruction présente un risque pour l'environnement
Exemples	Perrons, garages ou ateliers privés, constructions agricoles de remisage de matériel et de récoltes, murs de clôture de moins de 1.8 m. . .	Habitations individuelles, bureaux, ateliers, usines, garages à usage collectif, etc.	Établissements d'enseignement, stades, salles de spectacles, musées et tous les autres ERP. . .	Hôpitaux, casernes, centraux téléphoniques, garages d'ambulances, musées et bibliothèques abritant des œuvres majeures. . .	Complexes pétroliers et gaziers, complexes chimiques, barrages, centrales nucléaires. . .

TAB. 2.2 – *Typologie du bâti pour l'application des normes parasismiques PS-92. Elle distingue les bâtiments suivant leur fonction et les conséquences de leur défaillance en cas de séisme.*

2.3.2.1 Fonction principale d'un bâtiment ou d'une surface non construite

En ce qui concerne les bâtiments, nous avons distingué trois catégories de fonctions selon leur rôle dans la gestion des risques.

1. Les fonctions ayant pour vocation de diminuer le niveau de risque ou les conséquences d'une catastrophe, c'est-à-dire l'ensemble des acteurs intervenant directement dans la gestion d'une crise ou dans la prévention des risques [Winckell *et al.*, 2000] :

- services de secours : pompiers, SAMU ;
- services de santé : hôpitaux, cliniques ;
- services de maintien de l'ordre : police et caserne de gendarmerie ;
- instances dirigeantes : préfecture, sous-préfecture, mairie... ;
- infrastructures de transport : gares, aéroports ;

2. Les fonctions avec critère majorant le niveau de risque :

- en raison d'une population particulièrement vulnérable :
 - population sensible car fragile ou peu mobile : population hospitalisée (cliniques, hôpitaux, maisons médicalisées, dispensaires), population en bas âge (crèches), population âgée (maisons de retraite), population carcérale ;
 - population importante ou concentrée dans un espace restreint : la répartition de la population varie au cours du temps. On pourrait bien entendu prendre en considération la population mobile par le biais des réseaux de communication. Cependant, même en se concentrant sur la population statique, on se rend compte que sa répartition dans l'espace urbain change en fonction de l'heure de la journée ou de la nuit, en fonction du jour de la semaine ou même en fonction de l'époque de l'année (touristes) ;
 - ★ le jour, en semaine : établissements d'enseignement (écoles, collèges, lycées, universités), autres ERP (y compris les lieux de culte non chrétiens, les cinémas, les musées, les zones commerciales, les tribunes des stades...) ;
 - ★ le jour, le dimanche : lieux de culte chrétiens ;
 - ★ le soir : salles de spectacles ;
 - ★ la nuit : immeubles de densité de population élevée (type "barres" et tours), hôtels.
- en raison de la susceptibilité de produire des réactions en chaîne : installations soumises à déclaration ou autorisation, installations classées Seveso, barrages... ;
- en raison de leur rôle dans l'acheminement d'énergie : lignes électriques, lignes téléphoniques, conduites de gaz, transformateurs... ;
- réseaux de communication : s'ils sont touchés et hors-service, la communication entre différents quartiers de la ville sera plus difficile, et l'efficacité des moyens de secours lourdement affectée ;
 - nœuds : gares, aéroports, ponts, tunnels, carrefours importants ;
 - segments : axes routiers, voies ferrées, canaux, téléphoniques ;
- en raison d'une valeur commerciale élevée : centres commerciaux, magasins ;
- en raison d'une valeur culturelle ou patrimoniale élevée : musées, monuments historiques... ;

3. Les fonctions qui subissent l'événement sans pour autant augmenter ou diminuer le niveau de risque : ce qui n'a pas été cité jusqu'alors (maisons, immeubles de petite taille, bâtiments de stockage de matériaux non dangereux...).

Pour les surfaces non construites, leur atout au cours d'une crise est avant tout de pouvoir accueillir des populations sinistrées. On pense notamment aux pelouses des stades non cou-

verts (cf. le stade de New Orleans après le passage de Katrina), aux parcs de stationnement (qui peuvent être encombrés). Ainsi, on peut distinguer :

- les cimetières : leur rôle n'est pas très important dans la phase de gestion de crise ni dans celle de prévention ;
- les équipements sportifs divers (hors piscines) : stades, pistes d'athlétisme ; ces surfaces peuvent constituer des espaces utiles pour mettre en place un hôpital de campagne, des tentes pour héberger les personnes sinistrées, etc. ;
- les piscines : elles constituent des réserves d'eau non potable non négligeables en cas de besoin pour éteindre des incendies ;
- les parcs de stationnement : s'ils sont vides, ils peuvent constituer un atout comme les équipements sportifs, ce qui n'est pas le cas s'ils sont encombrés par des voitures ;

Mais d'autres facteurs entrent aussi en jeu dans la définition d'une vulnérabilité fonctionnelle des bâtiments.

2.3.2.2 Établissements recevant du public (ERP), capacité d'accueil et population sensible

Le premier facteur est directement lié à la fonction, puisqu'il porte sur le fait qu'un bâtiment soit considéré comme un ERP ou non. D'après l'article R123-2 du code de la construction et de l'habitation, "constituent des établissements recevant du public tous bâtiments, locaux et enceintes dans lesquels des personnes sont admises, soit librement, soit moyennant une rétribution ou une participation quelconque ou dans lesquels sont tenues des réunions ouvertes à tout venant ou sur invitation, payante ou non. Sont considérées comme faisant partie du public toutes les personnes admises dans l'établissement à quelque titre que ce soit en plus du personnel".

Les ERP constituent des bâtiments particulièrement vulnérables pour plusieurs raisons :

- Tout d'abord, les effectifs élevés de population accueillie les rendent plus vulnérables. En effet, il est plus difficile de gérer l'évacuation d'un grand groupe que celle de quelques personnes, en raison d'une inertie de groupe et d'éventuels mouvements de panique.
- La sensibilité ou fragilité de la population qui fréquente certains types d'ERP accroît leur vulnérabilité. Bien qu'ils aient des fonctions très variées (commerciale, culturelle, religieuse...), certains d'entre eux accueillent des personnes plus fragiles car caractérisées par une mobilité réduite. C'est notamment le cas des populations en bas âge (établissements d'enseignement primaire, colonies de vacances, crèches), hospitalisées (centres de soins divers) ou âgées (maisons de retraite). Le dispositif d'évacuation de tels établissements nécessite des mesures plus complexes que dans le cas d'un ERP "classique" (gare, musée ou centre commercial).
- Le manque de familiarité des lieux de la part du public rend également ces lieux plus vulnérables. En effet, la définition d'un ERP indique que seules les personnes admises en plus du personnel constituent le public. Les personnes qui fréquentent ces lieux ne sont donc pas des habitués (en général), ils ne sont donc ni conscients des risques auxquels ils sont exposés, ni familiers des lieux et ne connaissent pas *a priori* les mesures à suivre pour évacuer. Cette méconnaissance des lieux peut également être à l'origine de mouvements de panique.

Les ERP sont classés en types suivant leur activité et en catégories selon leur capacité d'accueil (cf. annexe 5). On peut donc quantifier leur vulnérabilité à partir de ce dernier paramètre. Un deuxième facteur de vulnérabilité fonctionnelle, également lié à la fonction, est la capacité d'accueil des ERP. En effet, plus un ERP possède une capacité d'accueil élevée, plus il peut drainer de public et être ainsi considéré comme vulnérable. Il existe cinq catégories d'ERP (tab. 2.3).

Catégorie	Capacité d'accueil
1 ^{re} catégorie	Plus de 1 500 personnes
2 ^e catégorie	Entre 701 et 1 500 personnes
3 ^e catégorie	Entre 301 et 700 personnes
4 ^e catégorie	Moins de 301 personnes à l'exception des établissements compris dans la 5 ^e catégorie
5 ^e catégorie	Établissements dans lesquels l'effectif du public n'atteint pas le chiffre fixé par le règlement de sécurité pour chaque type d'établissement.

TAB. 2.3 – *Catégories d'établissements recevant du public en fonction de leur capacité d'accueil.*

Les ERP constituent bien une catégorie de bâtiments à part et leur spécificité doit être prise en compte dans la typologie de vulnérabilité fonctionnelle, tout comme leur capacité d'accueil, qui permet de hiérarchiser différents niveaux de vulnérabilité.

2.3.2.3 Immeubles de grande hauteur (IGH)

Le dernier facteur porte sur la hauteur des immeubles, puisque les pompiers n'interviennent pas de la même façon ni avec les mêmes moyens en fonction de la hauteur du bâtiment. Les IGH sont des cas à part. Selon le code de l'urbanisme (article R. 122-2) :

“Constitue un immeuble de grande hauteur (...) tout corps de bâtiment dont le plancher bas du dernier niveau est situé, par rapport au niveau du sol le plus haut utilisable pour les engins des services publics de secours et de lutte contre l'incendie :

- à plus de 50 mètres pour les immeubles à usage d'habitation, tels qu'ils sont définis par l'article R.111-1 ;

- à plus de 28 mètres pour tous les autres immeubles. Fait partie intégrante de l'immeuble de grande hauteur l'ensemble des éléments porteurs et des sous-sols de l'immeuble. En font également partie les corps de bâtiments contigus, quelle que soit leur hauteur, lorsqu'ils ne sont pas isolés de l'immeuble de grande hauteur dans les conditions précisées par le règlement de sécurité prévu à l'article R.122-4. Par dérogation à l'alinéa précédent, les parcs de stationnement situés sous un immeuble de grande hauteur ne sont pas considérés comme faisant partie de l'immeuble lorsqu'ils sont séparés des autres locaux de l'immeuble par des parois coupe-feu de degré 4 heures et qu'ils ne comportent aucune communication intérieure directe ou indirecte avec ces locaux.”

Cette définition implique qu'il faut identifier les bâtiments à fonction résidentielle de plus de 50 m de hauteur et les autres bâtiments de plus de 28 m de hauteur.

2.3.2.4 Proposition de typologie de vulnérabilité fonctionnelle des infrastructures

Il nous a semblé nécessaire de simplifier au maximum la typologie des infrastructures, tout en conservant les informations nécessaires aux gestionnaires du risque ou d'une crise (tab. 2.4 et 2.5). C'est pourquoi un seul attribut regroupant la fonction et le type d'activité a été retenu. La typologie des fonctions propose un regroupement des différents types de bâtiments décrits au paragraphe 2.3.2.1. A propos du bâti (constructions), un attribut "Établissement classé Seveso" a été ajouté, en raison de notre problématique orientée sur les risques technologiques. Il est attribué uniquement aux bâtiments correspondant à des points sources d'accidents technologiques. Comme précisé dans les paragraphes 2.3.2.2 et 2.3.2.3, un intérêt particulier est porté aux ERP et aux IGH, en raison des dispositions particulières à prendre en cas d'intervention en urgence ou en cas d'évacuation, d'où des attributs "ERP" et "IGH". Enfin, parmi ces ERP, les établissements accueillant une population particulièrement sensible sont identifiés par un attribut supplémentaire ("population sensible").

Attributs	Modalités
Fonction principale	Résidentielle, industrielle, commerciale, artisanale/agricole, enseignement, instance dirigeante, autre tertiaire et administrative, de services de secours, de maintien de l'ordre, médicale, culturelle, religieuse, sportive, de transport, carcérale, autre
Établissement classé Seveso	Seuil bas/seuil haut
ERP	Oui/non
Capacité d'accueil	Effectifs si connus ou catégorie ERP
IGH	Oui/non
Population sensible	Oui/non

TAB. 2.4 – Proposition de typologie de la vulnérabilité fonctionnelle du bâti. Cette typologie est basée sur six attributs : la fonction principale, le fait d'être un établissement classé Seveso, un ERP, un IGH, un établissement accueillant une population sensible et la capacité d'accueil d'un ERP.

La typologie des surfaces non construites est très simplifiée ; seul un attribut est retenu (type). La typologie est justifiée par le "rôle" qu'elles peuvent jouer en cas de catastrophe.

Attribut	Modalités
Type	Cimetière, parc de stationnement, surface à vocation sportive, piscine, piste aérienne.

TAB. 2.5 – Proposition de typologie de la vulnérabilité fonctionnelle des surfaces non construites. La typologie des surfaces non construites est plus simple, elle n'identifie qu'un seul attribut, le type.

Si cette proposition de typologie de la vulnérabilité fonctionnelle ne tient pas entièrement compte des données réelles dont nous disposons, elle est cependant adaptée à une étude

à l'échelle de l'agglomération. A présent, nous allons nous intéresser à une autre catégorie d'éléments exposés, la population.

2.3.3 Caractérisation de la vulnérabilité de la population

La vulnérabilité de la population peut être prise en compte par le biais de deux méthodes, l'une quantitative, prenant en compte les densités de population, l'autre qualitative, basée sur les facteurs de vulnérabilité.

2.3.3.1 Prise en compte de la densité de population

Les densités de population représentent un facteur aggravant de la vulnérabilité, c'est pourquoi il est important de les quantifier. Nous avons pris en compte les densités de population dans l'objectif d'identifier des quartiers ou des îlots plus ou moins vulnérables. Afin de mieux cibler la population exposée, nous avons ramené les données de population d'îlot (recensement 1999) à l'espace bâti (fig. 2.18), comme proposé par C. Weber [Weber, 1995a ; Weber, 1995b], V. Fouchier [Fouchier, 1998] ou K. Chen *et al.* [Chen *et al.*, 2004], cette surface bâtie correspondant à la somme des surfaces au sol des bâtiments. Les zones non bâties (rues, emprises des réseaux de transport, cours d'eau, parcs, friches...) sont alors exclues de l'analyse, ce qui permet d'appréhender des densités plus proches de la réalité. Les zones bâties de chaque îlot sont obtenues par simple intersection de la couche " îlots" avec la couche " bâtiments". Puis la surface totale occupée par les bâtiments d'un même îlot est calculée. La population dudit îlot est alors associée à cet ensemble de bâtiments, de manière à calculer une densité " réelle", en divisant la population recensée par la surface bâtie. Cette opération permet de mieux représenter la réalité du paramètre de densité, notamment pour les îlots peu urbanisés (fig. 2.18).

Sur cette figure, dans le cas a/, le calcul de la densité est effectué à partir de la surface de l'îlot, qui est composée des bâtiments et des espaces non bâtis. Par exemple, l'îlot central est caractérisé par une densité de 5 940.92 hab./km². Dans le cas b/, la densité a été calculée à partir de la surface bâtie réelle, la population est ramenée à l'espace bâti. La densité de l'îlot central est de 33 186.15 hab./km². La différence entre les densités obtenues par les deux méthodes est particulièrement flagrante pour les îlots peu bâtis, comme c'est le cas pour l'îlot supérieur (157.87 hab./km² dans le cas a/ et 14 669.21 hab./km² dans le cas b/). Précisons que ce dernier n'est pas représenté dans sa totalité sur l'extrait de carte. L'ensemble des résultats est résumé dans le tableau 2.6 : la densité a) est calculée à partir de la population recensée dans l'îlot et la surface de ce même îlot. La densité b) est calculée à partir du même effectif de population mais par rapport à la surface bâtie de l'îlot (surface au sol des bâtiments).

Pour chaque commune considérée, l'unité de recensement la plus fine a été prise en compte en fonction du découpage de la commune par l'INSEE : l'îlot, l'IRIS ⁴¹ ou la commune dans sa totalité.

⁴¹IRIS : îlots regroupés pour l'information statistique ; unité de découpage pour le recensement de toutes les communes urbaines de plus de 10 000 habitants et la plupart des communes de 5 000 à 10 000 habitants.

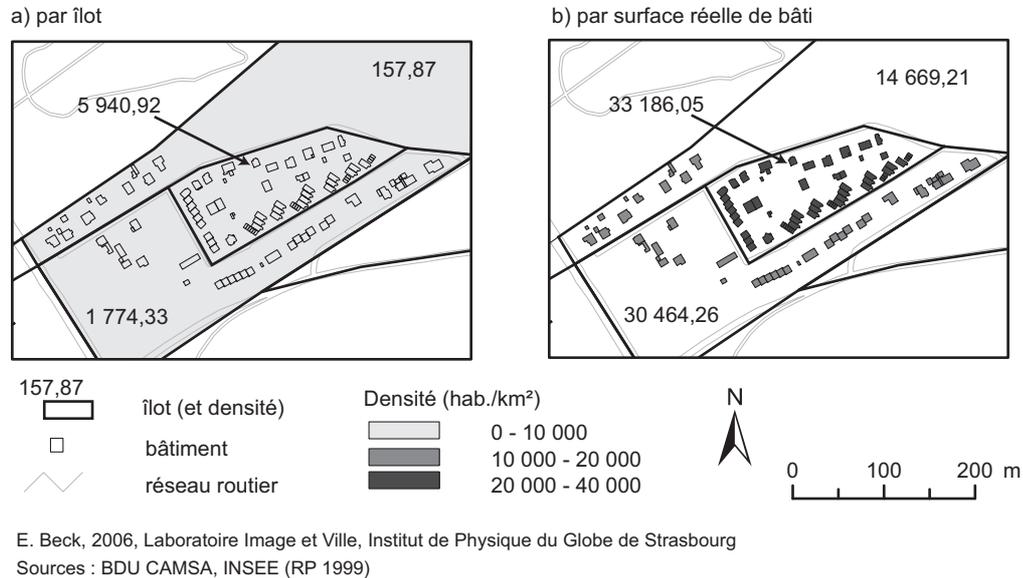


FIG. 2.18 – Exemple de quartier où la densité de population a été ramenée à la surface bâtie. a) Calcul de densité à partir d'îlots. b) Calcul de densité à partir de la surface bâtie réelle. La densité obtenue par la deuxième méthode de calcul reflète davantage la réalité de la répartition de la population, surtout dans les îlots les moins urbanisés.

Îlot considéré	Population recensée (hab)	Surface de l'îlot (m ²)	Densité a) (hab./km ²)	Surface bâtie (m ²)	Densité b) (hab./km ²)
Supérieur	13	82 345	157.87	886.21	14 669.21
Central	108	18 179	5 940.92	3 254.38	33 186.05
Inférieur	71	40 015	1 774.33	2 330.60	30 464.26

TAB. 2.6 – Densités obtenues pour les trois îlots représentés sur la figure 2.18 suivant les deux méthodes. a) la densité est calculée à partir de la population recensée pour l'îlot et la surface du même îlot; b) la densité est calculée à partir du même effectif de population mais par rapport à la surface bâtie (surface des bâtiments au sol).

Étant donné que le recensement de la population constitue un comptage de la population à son domicile, il serait préférable de pouvoir prendre en compte uniquement les surfaces consacrées à la fonction résidentielle. Or, il n'est pas toujours possible de faire cette distinction car tout dépend des données disponibles. Par exemple, dans le cas de la BD Topo®, les données de fonction du bâtiment ⁴² sont fournies à l'échelle du groupe de bâtiments mitoyens et non du bâtiment, car la BD Topo® fait l'objet d'une généralisation : comment distinguer un commerce surmonté de deux étages d'appartements et adjacent à un cinéma et un bâtiment administratif ? Quelle est la fonction de cet ensemble ? Si la fonction résidentielle n'est pas prédominante, elle n'est pas attribuée à cet immeuble et la surface de l'immeuble ne peut être comptabilisée dans la surface bâtie résidentielle. Nous conviendrons qu'il est plus prudent de prendre en compte l'ensemble des bâtiments pour calculer ces densités de population, malgré une certaine sous-estimation.

Bien sûr, on pourrait aller plus loin, en relevant le nombre de sonnettes à chaque porte, ou en prenant en compte la hauteur, donc le nombre d'étages, afin de se rapprocher encore plus de la densité réelle. Mais cette démarche serait peu applicable à l'échelle d'une agglomération.

2.3.3.2 Prise en compte de la représentation cognitive du risque par la population

La deuxième approche d'évaluation de la vulnérabilité de la population est qualitative, si l'on s'en tient à la distinction faite par R. D'Ercole [D'Ercole, 1994], car elle intègre une dimension sociale par la prise en compte de facteurs de vulnérabilité. L'un de ces facteurs aggravants de vulnérabilité correspond à la représentation cognitive des risques, dont l'évaluation a nécessité la mise en place d'une enquête ⁴³.

– Objectifs et hypothèses de l'enquête

Deux objectifs ont motivé la mise en place d'une enquête : 1/ élaborer un indice de vulnérabilité de la population basé sur un certain nombre de facteurs, parmi lesquels la représentation cognitive des risques et la connaissance de ces risques ; 2/ dans un but opérationnel, vérifier l'impact des campagnes d'information menées par les autorités et les industriels sur la connaissance des risques et des consignes de sécurité à suivre en cas de catastrophe.

Nous avons souhaité vérifier plusieurs hypothèses :

- il existe des différenciations spatiales de la vulnérabilité, de la représentation cognitive des risques et de la connaissance des risques et des consignes de sécurité ;
- il existe des différenciations sociales de la vulnérabilité, de la représentation cognitive des risques et de la connaissance des risques et des consignes de sécurité ;
- la vulnérabilité d'un individu dépend de la nature de l'aléa auquel il est exposé ;
- les campagnes d'information menées par les industriels et les autorités compétentes ont un faible impact sur la connaissance des risques et des consignes de sécurité par la population.

⁴²Dans la BD Topo, la fonction d'un bâtiment est décrite par un attribut intitulé "nature" du bâtiment.

⁴³Cette enquête a été réalisée en collaboration avec Sandrine Glatron (Laboratoire Image et Ville) entre mi-2004 et fin 2005 [Beck et Glatron, 2006].

La vulnérabilité d'un individu dépend d'un certain nombre de facteurs (cf. § 1.1.2.3). R. D'Ercole [D'Ercole, 1996] classe les facteurs de vulnérabilité en trois catégories : les facteurs liés à la perception ⁴⁴, ceux liés à la connaissance des moyens de protection et les facteurs contraignants d'ordre social (annexe 10). Pour expliquer ces trois catégories de facteurs, il identifie des variables de localisation, socio-économiques et d'information. Ces facteurs de vulnérabilité et les modalités associées sont spécifiques à sa problématique (risque volcanique à Cotopaxi, Équateur). Il nous semble plus judicieux de considérer des facteurs valables quel que soit le contexte de l'étude. D'après nous, l'ensemble de ces facteurs participe d'une vulnérabilité sociale de l'individu. Nous en identifions trois catégories (tab. 2.7) : la représentation cognitive des risques, la connaissance des risques et les facteurs socio-démographiques et de localisation.

L'influence de la **représentation** des risques sur la vulnérabilité a déjà été discutée dans le premier chapitre (cf. § 1.1.3.1).

La **connaissance** des risques intervient directement sur la vulnérabilité par l'intermédiaire des consignes de sécurité, qu'il s'agisse de la connaissance des aléas et plus particulièrement de leur manifestation, des consignes de sécurité à suivre en cas de catastrophe, de l'expérience vécue d'une catastrophe ou de la connaissance du contexte local : on est souvent plus sensibilisé à la prévention d'un risque lorsque l'on en connaît l'existence et on le craindrait dès lors moins. Par exemple, nous supposons qu'un individu ayant déjà vécu une catastrophe est moins vulnérable car *a priori* capable de reconnaître la catastrophe. Il saura alors quelle réaction adopter.

Quant aux facteurs **socio-démographiques**, l'âge, la situation familiale, le sexe et la catégorie socio-professionnelle nous semblent importants et susceptibles d'influencer la vulnérabilité. L'âge de l'enquêté peut jouer dans le sens où des individus âgés sont moins mobiles et de santé plus fragile (ils sont susceptibles de moins bien récupérer des suites de blessures causées par la catastrophe). Les parents de jeunes enfants sont considérés comme plus vulnérables que les adultes sans enfants car ces premiers sont susceptibles de se rendre à l'école ou à la crèche pour chercher leurs enfants et les mettre près d'eux. En se déplaçant, ils s'exposent peut-être davantage, encombrant la circulation, finalement ils aggravent une situation qui pouvait être de prime abord sans conséquences pour eux et leurs enfants. Des études anglo-saxonnes ont montré l'influence du facteur "sexe" : d'après P. Slovic [Slovic, 1999], les femmes ont tendance à surestimer les risques par rapport aux hommes, ce qui les rend plus vulnérables. L'influence de la familiarité au risque par l'intermédiaire de la profession et du secteur d'activité n'est pas évidente : dans certains cas, les individus qui côtoieront quotidiennement un risque y seront plus sensibilisés [Zonabend, 1989 ; Denis, 1998], d'autres auront tendance à le banaliser et donc le sous-estimer.

Nous considérons que l'influence de la **localisation** sur la vulnérabilité d'un individu n'est pas négligeable, qu'il s'agisse de la proximité d'un centre de secours ou d'une source de danger. Dans le second cas, nous supposons qu'un individu résidant ou travaillant à proximité d'une source de danger y est plus sensibilisé d'une part parce qu'il la perçoit, d'autre part parce qu'il est censé être touché par des campagnes de prévention spécifiques. Plusieurs études ont montré le rôle de la distance euclidienne ⁴⁵ à une source de danger sur la

⁴⁴Comme discuté dans le premier chapitre (cf. § 1.1.2.3), nous préférons le terme de "représentation cognitive des risques" à celui de "perception", employé par R. D'Ercole.

⁴⁵Distance euclidienne : distance géométrique, à vol d'oiseau, ne prenant pas en compte la topographie ou d'autres éléments géographiques.

Catégories de facteurs	Facteurs de la vulnérabilité d'un individu	Modalités diminuant la vulnérabilité (ou ne l'aggravant pas)	Modalités augmentant la vulnérabilité
Représentation cognitive des risques	Sentiment d'exposition à l'aléa	Concordante avec l'aléa réel	Surestimation ou sous-estimation
Connaissance des risques	Connaissance des aléas (manifestations du phénomène...)	Bonne connaissance	Ignorance
	Connaissance du contexte local	Bonne connaissance	Ignorance
	Connaissance des moyens d'alerte	Bonne connaissance	Ignorance
	Connaissance des consignes de sécurité	Bonne connaissance	Ignorance ou connaissance erronée
	Connaissance des personnes en charge de l'information des risques	Bonne connaissance	Ignorance
	Connaissance de catastrophes récentes dans la région	Connaissance	Ignorance
Facteurs socio-démographiques et de localisation	Proximité d'une source de danger	Eloigné	Proche
	Expérience d'une catastrophe	Catastrophe éprouvée	Absence d'expérience d'une catastrophe
	Proximité d'un centre de secours (hôpital, caserne de pompiers)	Proche	Eloigné
	Age	Personnes jeunes et d'âge mûr	Personnes âgées
	Sexe	Masculin	Féminin
	Catégorie socio-professionnelle (PCS)	Personnes responsables d'autrui	PCS isolées ou sous la responsabilité d'autrui
	Niveau de formation	Elevé	Faible
	Type de logement	Maison	Appartement
	Statut vis-à-vis du logement	Locataire	Propriétaire
Situation familiale	Personnes sans enfants ou avec "grands" enfants (âgés de 6 ans et +)	Parents d'enfants en bas âge	

TAB. 2.7 – Facteurs influençant la vulnérabilité d'un individu. Nous les avons classés en trois catégories : la représentation cognitive des risques, la connaissance des risques et les facteurs socio-démographiques et de localisation.

représentation des risques ⁴⁶, même si les modalités des variations de la représentation ne sont pas faciles à cerner. Selon les travaux d'E. Bonnet, la représentation des risques n'évolue pas de manière linéaire avec la distance géographique car, lorsque celle-ci augmente, des réactions plus contrastées peuvent être observées [Bonnet, 2002]. Dans un autre cas, d'après une étude menée par A. Dauphiné dans les années 1980, la distance influence les perceptions de manière non linéaire, avec une surestimation du risque à proximité directe de la source de danger [Dauphiné, 2001, *in* Bonnet, 2002].

Certains de ces facteurs interviennent directement sur la représentation cognitive des risques (familiarité, connaissance...). A. Dauphiné [Dauphiné, 2001] a recensé les différents facteurs intervenant dans la perception ⁴⁷ des risques (cf. annexe 11). Certains de ces facteurs relèvent directement de la nature intrinsèque de l'aléa (potentiel catastrophique, origine) voire d'un accident en particulier (médiatisation, compréhension, date d'occurrence, effets sur les générations futures) ou de la manière dont il est géré (effort des institutions). Dans notre cas, nous nous intéressons davantage aux contraintes propres à l'individu (ou au groupe d'individus), à ses caractéristiques socio-démographiques, sa localisation, et son état de connaissances.

– Protocole d'enquête

Afin de vérifier les hypothèses formulées, nous avons élaboré une enquête par questionnaire. D'autres techniques d'enquête auraient pu être choisies pour évaluer la représentation cognitive des risques. On peut citer notamment l'entretien [Girard, 2004 ; Bernier, 2004] ou la carte mentale (ou sketch map ou dessin à main levée), qui permet de savoir si les enquêtés ont connaissance de la localisation des sources de danger et de l'espace qui y est exposé [Bonnet, 2002]. Notre objectif était de pouvoir collecter des informations sur un grand nombre d'individus, ce qui a écarté la technique de l'entretien. La carte mentale est par ailleurs critiquée par certains [Ramadier et Bronner, 2006] en raison, entre autres, de la difficulté de certaines personnes à se représenter l'espace et à le représenter sur une feuille de papier. Par ailleurs, nous avons préféré l'enquête en face à face, entre un enquêteur et un enquêté, en raison de l'importance de l'ordre des questions qui interdit l'auto-administration du questionnaire (car l'enquêté peut survoler l'ensemble des questions, revenir en arrière...).

Le questionnaire comporte 43 questions, dont certaines sont déclinées en sous-questions. Au total, ce sont 28 questions fermées ⁴⁸ ou semi-ouvertes ⁴⁹ et 29 questions ouvertes ⁵⁰ qui sont posées (cf. annexe 12).

Après avoir replacé l'importance des risques majeurs dans les préoccupations des citadins ⁵¹, les questions concernent la connaissance des risques locaux, des moyens de gestion,

⁴⁶Ceci est valable uniquement pour certains risques, localisés, connus et dont on peut avoir une perception par le biais des sens visuel et olfactif, comme une rivière dont une période de crue a laissé des traces dans le paysage, les odeurs d'une usine dangereuse, etc. [Glatron et Beck, 2005]. Ce constat n'est en effet pas vérifié dans le cas de risques plus diffus dans l'espace (risque sismique) ou méconnus (TMD) [Hiegel *et al.*, 2004 ; Beck *et al.*, 2004].

⁴⁷Comme discuté dans le premier chapitre (cf. § 1.1.2.3), nous préférons le terme de "représentation cognitive des risques" à celui de "perception", employé par A. Dauphiné.

⁴⁸Question fermée : réponse dichotomique ou à choix multiple (avec réponse unique ou multiple).

⁴⁹Question semi-ouverte : à choix multiple avec possibilité de donner une réponse "autre".

⁵⁰Question ouverte : à réponse libre.

⁵¹Comme l'ont montré les enquêtes menées par A. Lalo [Lalo *et al.*, 1994 ; Lalo *et al.*, 1995], l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire) [Charron et Milochevitch, 2003] ou E. Bonnet [Bonnet, 2002], la représentation cognitive des risques peut être évaluée à partir de questions portant sur la connaissance des risques majeurs d'une manière générale (notamment sur leur place parmi d'autres problèmes de société ou d'autres questions environnementales) ou sur les risques pris dans un contexte plus local.

des consignes à suivre en cas de catastrophe naturelle ou industrielle, des modalités de l'information préventive ainsi que des souhaits éventuels pour améliorer la sécurité face aux risques majeurs. Une fiche signalétique permet de connaître les principales caractéristiques socio-démographiques des enquêtés.

– **Population enquêtée : population mère ⁵² et échantillonnage**

L'occupation de l'espace par la population varie avec le temps (le cas des migrations pendulaires et des cités-dortoirs illustre particulièrement bien ce fait). Nous supposons que la représentation des risques par un individu varie suivant sa localisation et plus particulièrement suivant sa proximité par rapport à une source de danger : le sentiment d'une personne vivant dans un village rural et interrogée à son domicile peut être différent si on la questionne sur son lieu de travail, une usine chimique par exemple. A partir de ces deux constats, on peut supposer que des variations de la vulnérabilité dans le temps et dans l'espace sont observables. Aussi, nous avons constitué deux groupes d'individus ⁵³, une population nocturne (correspondant aux "habitants") et une population diurne (comportant les actifs sur leur lieu de travail et le public, constitué de personnes fréquentant des lieux de formation - lycéens, étudiants, public de centres de formations diverses -, des foyers sociaux, des maisons de retraite ou des centres hospitaliers).

La population mère est donc constituée de l'ensemble des individus majeurs résidant et/ou travaillant dans une des communes de notre zone d'étude. Étant donné les effectifs de la population de l'agglomération, nos moyens financiers et humains et le temps disponible pour cette étude, nous n'avons pas eu la possibilité d'interroger l'ensemble de la population mère. C'est pourquoi nous avons opté pour l'interrogation d'un sous-ensemble d'individus représentatif de l'ensemble de la population mère. Nous avons fixé à 500 personnes le nombre d'individus à enquêter. Les enquêtés ont été répartis de manière à ce que les effectifs des deux groupes de populations (nocturne/diurne) soient égaux : 250 personnes pour le groupe de population nocturne (habitants) et 250 personnes pour le groupe de population diurne (dont 200 actifs et 50 personnes fréquentant des lieux publics, que nous appelleront le groupe "public").

Afin d'assurer la représentativité de notre échantillon et en l'absence d'une base de sondage fiable ⁵⁴, nous avons constitué notre échantillon par la méthode des quotas croisés ⁵⁵ pour la population nocturne et les actifs, suivant une stratification multiple et des critères différents selon le groupe considéré.

⁵²Population mère (ou population parente) : ensemble des éléments sur lesquels porte l'étude. Un échantillonnage de cette population peut, dans certains cas, s'avérer nécessaire.

⁵³Nous avons pris l'hypothèse selon laquelle la majorité de la population active fréquente des lieux différents la nuit et le jour et que la majorité de la population de l'agglomération travaille le jour. Par ailleurs, seule la population ayant un domicile fixe dans l'une des communes de l'étude a été prise en compte; nous avons écarté les personnes qui n'y vivent pas de façon permanente, à savoir les personnes résidant dans des foyers d'accueil, des hôtels, des pensionnats, des cités universitaires, etc.

⁵⁴Une base de sondage correspond à une liste de noms (liste électorale, liste du personnel d'une entreprise, etc.) à partir de laquelle des tirages aléatoires peuvent être réalisés. L'annuaire téléphonique ne constitue pas une base de sondage représentative de la population car elle exclut les personnes dont le numéro de téléphone figure sur liste rouge et celles n'ayant pas de téléphone fixe [Depelteau, 2000].

⁵⁵La méthode des quotas (méthode d'échantillonnage empirique) consiste à "construire un échantillon qui ressemble à la population parente, à partir d'informations statistiques sur la structure de cette population" [Berthier, 2000, p. 119]. Les quotas peuvent être simples ou croisés; dans ce second cas, ils consistent à combiner les critères (sexe, âge, profession et catégorie socio-professionnelle - PCS - ...) et permettent ainsi d'améliorer la représentativité de l'échantillon.

• **Population nocturne** : notre objectif étant d’interroger un échantillon représentatif de la population résidante de la région d’étude, nous avons pris comme référence le recensement de 1999 et la répartition par commune, âge et sexe. Nous avons utilisé cette répartition pour déterminer la composition de notre échantillon de manière proportionnelle à la population mère selon ces trois critères.

• **Population diurne (“actifs”)** : la question des données s’est posée pour la définition de la population active. En effet, le recensement de la population (données INSEE) ne fournit que des données sur l’activité des habitants ramenés à leur commune de domicile, et non la commune dans laquelle ils travaillent. C’est pourquoi nous avons construit notre échantillon de population active à partir de données de la base SIRENE⁵⁶. Celle-ci recense le nombre de personnes travaillant dans chaque catégorie d’activité (APE⁵⁷) dans les communes considérées. Nous avons constitué un échantillon de manière proportionnelle à partir des effectifs par APE et par commune de lieu de travail.

• **Population diurne (“public”)** : ne disposant pas de données sur le nombre de lycéens âgés de plus de 18 ans et sur le nombre de personnes inscrits dans un autre organisme de formation... , nous avons arbitrairement choisi d’interroger cinq lycéens, douze étudiants des universités et grandes écoles, huit personnes suivant une formation continue (formations diverses), deux prisonniers, douze personnes hospitalisées, six résidents de maisons de retraite, cinq personnes vivant dans un foyer socio-médical. Nous avons procédé par échantillonnage accidentel⁵⁸, en nous rendant dans les lieux susceptibles d’accueillir les catégories de personnes identifiées, c’est-à-dire dans les hôpitaux, maisons de retraite, lycées, université, foyers d’hébergement et lieux de formation.

– Traitements des résultats de l’enquête

Les résultats de l’enquête peuvent être interprétés de différentes manières en fonction des hypothèses à vérifier et des résultats recherchés. Dans le cadre de notre travail, nous avons souhaité tout d’abord analyser la répartition des réponses à certaines questions précises, à l’aide de tris à plat⁵⁹, afin d’être en mesure de répondre aux questions suivantes :

- Quels sont les problèmes de société qui préoccupent le plus les individus interrogés ?
- Quels sont les risques auxquels ils se sentent le plus exposés sur leur lieu de travail/à leur domicile ?
- Se sentent-ils suffisamment bien informés sur les risques de manière générale ? Sur les consignes à suivre en cas de catastrophe ?
- Connaissent-ils les consignes de sécurité à suivre en cas de catastrophe ?

Nous avons procédé à quelques tris croisés⁶⁰ afin de vérifier l’influence de la commune de résidence (ou de travail) sur le sentiment de se sentir suffisamment informé sur les risques et

⁵⁶SIRENE : système informatique répertoriant les entreprises et les établissements. Données du 4e trimestre 2004.

⁵⁷Activité principale exercée par une entreprise ou par un établissement. Ce code est attribué par l’INSEE à chaque entreprise et à chaque établissement selon son activité principale. Il est constitué de 3 chiffres et une lettre d’après la nomenclature d’activités française (NAF).

⁵⁸L’échantillonnage accidentel n’a aucune contrainte, sinon de connaître les lieux où rencontrer les individus répondant aux critères de l’étude.

⁵⁹Tri à plat : calcul de la distribution des effectifs et des pourcentages des modalités d’une question. Les tris à plat permettent une description simple d’une seule variable.

⁶⁰Tri croisé : calcul de la répartition des réponses données (variable à expliquer) selon un critère défini (variable explicative). Consiste en une analyse bivariée (deux variables) permettant de comprendre les réponses obtenues. Les variables à expliquer sont généralement les réponses aux questions spécifiques à l’enquête, les variables explicatives correspondent en général aux variables décrivant l’enquêté (socio-démographiques, de localisation...).

les consignes de sécurité et celle du groupe (nocturne/actif/public) sur les risques auxquels les individus se sentent exposés.

Étant donné la multiplicité des facteurs à prendre en compte pour évaluer la vulnérabilité de la population, la construction et l'utilisation de deux indices nous a semblé être un bon moyen d'atteindre une vision synthétique. Les études de vulnérabilité par le biais des indices datent d'une dizaine d'années [Chardon, 1994 ; D'Ercole, 1996 ; Cutter *et al.*, 2000]. Elles visent notamment à caractériser la vulnérabilité sociale de la population, à partir de données d'enquête et de recensement. L'élaboration d'un indice implique de choisir les différents facteurs qui vont l'influencer. Dans notre cas, nous avons intégré des facteurs influant sur la vulnérabilité et sur la représentation cognitive des risques (tab. 2.7). Le tableau 2.8 reprend ces facteurs en les adaptant à notre questionnaire.

Au final, nous obtenons 22 facteurs, parmi lesquels le sentiment d'exposition aux risques, la capacité d'imaginer qu'une telle catastrophe puisse se produire dans la région (facteurs liés à la représentation cognitive des risques), la connaissance des moyens d'alerte, des consignes de sécurité à suivre, des catastrophes ou incidents récents ayant affecté la région (facteurs liés à la connaissance des risques), l'âge, la catégorie socio-professionnelle, le statut familial, l'expérience d'une catastrophe et la localisation par rapport à une caserne de pompiers, une usine dangereuse, un hôpital (facteurs socio-démographiques et de localisation).

Catégorie de facteurs	Facteurs de vulnérabilité
Représentation cognitive	Sentiment d'exposition au risque 1*
	Sentiment d'exposition au risque 2*
	Capacité d'imaginer que la catastrophe puisse se produire
Connaissance	Connaissance du contexte local
	Connaissance des moyens d'alerte
	Connaissance des consignes à suivre
	Réception/conservation d'une plaquette d'information sur les risques
	Connaissance des personnes chargées de l'information
	Connaissance de catastrophes récentes dans la région
Facteurs socio-démographiques et de localisation	Distance à une source de danger
	Distance à un hôpital
	Distance à une caserne de pompiers
	Vécu d'une catastrophe 1*
	Vécu d'une catastrophe 2*
	Vécu d'une catastrophe par ses proches
	Age
	Sexe
	Catégorie socio-professionnelle (PCS)
	Niveau de formation/de scolarisation
	Type de logement
	Statut vis-à-vis du logement
Situation familiale	

* Plusieurs questions de l'enquête ont été utilisées pour qualifier le sentiment d'exposition au risque et le vécu d'une catastrophe (respectivement questions Q7 et Q8a, Q11 et Q32), c'est pourquoi deux facteurs portent sur ces problématiques.

TAB. 2.8 – Facteurs retenus pour la construction de l'indice de vulnérabilité de la population. Chaque facteur prend une valeur comprise entre 0 et 1 selon la réponse de l'individu.

Une fois les différents facteurs déterminés, nous avons identifié les modalités de réponse se rapportant à chaque facteur et nous leur avons attribué une valeur entre 0 et 1 (0 correspond à une vulnérabilité très faible, 1 à une valeur maximale de vulnérabilité). L'indice est calculé par la moyenne des valeurs obtenues pour chaque facteur (équ. 2.10).

$$I_{vt} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{22} k_i} \sum_{i=1}^{22} k_i I_{vfi} \quad (2.10)$$

avec I_{vt} l'indice total de vulnérabilité, k une variable de pondération, i le i^e facteur et I_{vfi} l'indice de vulnérabilité du i^e facteur.

Dans un but opérationnel, nous avons souhaité identifier les personnes particulièrement vulnérables parce qu'ayant une faible représentation cognitive des risques ou un déficit de connaissances sur ces risques. C'est pourquoi nous avons calculé l'indice global en affectant une pondération plus élevée aux facteurs liés à la perception et à la connaissance ($k = 2$ pour ces facteurs, $k = 1$ pour les autres facteurs).

Soulignons qu'il n'y a pas de vulnérabilité intrinsèque, mais bien une vulnérabilité par aléa. Un individu peut être vulnérable à l'un mais pas à l'autre. Dans notre cas, nous nous sommes focalisées sur les deux aléas étudiés dans le cadre de cette thèse, bien que d'autres aléas soient abordés à travers l'enquête. Nous obtenons donc deux indices pour chaque individu enquêté, un indice de vulnérabilité aux séismes et un indice de vulnérabilité aux sites technologiques dangereux.

La représentation cartographique des résultats de l'enquête est apparue comme une étape nécessaire à la compréhension des différenciations spatiales de représentation cognitive des risques.

Devant la délicate généralisation de résultats obtenus pour les citoyens interrogés isolément, nous avons opté pour une représentation par zones, permettant ainsi d'agréger nos données. Notre espace d'investigation a été sectorisé suivant deux critères : d'une part les IRIS (INSEE), d'autre part la caractérisation morphologique de l'espace urbain (bâti), nous permettant de proposer des quartiers relativement homogènes en termes d'occupation du sol et de tissu urbain, à partir d'une analyse sommaire par photo-interprétation et de nos connaissances du terrain d'étude.

La taille de notre échantillon peut entraîner dans certains cas des difficultés dans la généralisation des résultats à l'ensemble d'un quartier homogène. En effet, dans certains quartiers, moins de cinq personnes ont été interrogées.

2.3.4 Vulnérabilité totale

Jusqu'ici nous avons décrit une proposition d'évaluation des aléas et des vulnérabilités, sans pour autant les combiner. En effet, ils ont été étudiés indépendamment les uns des autres. Or, notre objectif était bien de présenter une démarche globale et intégrée d'étude des risques. La vulnérabilité du bâti et de la population dépend d'un certain nombre de facteurs : vulnérabilité fonctionnelle, vulnérabilité physique, densité de population. Il

convient de simplifier cette information dans l'objectif, à terme, de produire des cartes de vulnérabilité, puis des cartes de risque.

La **vulnérabilité fonctionnelle** dépend de facteurs énoncés dans le tableau 2.4. Dans le cas présent, nous proposons de ne conserver que deux facteurs, la fonction et le statut d'IGH. Les niveaux de vulnérabilité (tab. 2.9) sont attribués selon l'importance de la fonction considérée au cours d'une crise (cf. § 2.3.2.1).

Modalité (fonction)	Niveau de vulnérabilité	Modalité (IGH)	Niveau de vulnérabilité
Indéfinie	Indéfini	Non (immeuble de hauteur normale)	Nul
Résidentielle, administrative, autre, agricole, artisanale, industrielle	Faible	Oui (IGH)	Elevé
ERP, commerces, établissements d'enseignement, établissements sportifs, lieux de culte, lieux culturels	Faible à moyen		
Instances dirigeants, services de secours, services médicaux, services de maintien de l'ordre	Moyen à élevé		
Bâtiments sources d'un accident technologique	Elevé		

TAB. 2.9 – Niveaux de vulnérabilité selon la fonction et la hauteur du bâtiment. Cette typologie est basée sur le rôle joué au cours d'une crise par les "services" hébergés par ces bâtiments. Certains services ont un rôle primordial (instances dirigeantes, services médicaux, services de maintien de l'ordre), d'autres sont susceptibles d'aggraver la situation (points sources d'un accident technologique), etc.

Concernant la **vulnérabilité physique** des bâtiments aux séismes, nous proposons d'identifier trois classes selon la différence Δf_0 entre la fréquence de bâti (f_{0B}) et celle de site (f_0) :

- $\Delta f_0 > 2$ Hz : vulnérabilité faible ;
- $1 < \Delta f_0 < 2$ Hz : vulnérabilité moyenne ;
- $\Delta f_0 < 1$ Hz : vulnérabilité élevée.

La vulnérabilité est maximale à partir du moment où les deux fréquences f_{0B} et f_0 sont égales. Les seuils de 1 Hz et 2 Hz ont été choisis pour tenir compte de l'incertitude due au mode de calcul de la fréquence fondamentale de bâti (dérivée de la hauteur du bâtiment), même si l'incertitude varie selon le nombre d'étages du bâtiment.

Enfin, en ce qui concerne la **densité de population**, des classes de valeurs seront également définies, elles dépendront de la distribution des valeurs rencontrées dans la zone d'étude. Devant la difficulté de ramener la représentation cognitive du risque à l'échelle du bâtiment, étant donné la taille trop petite de notre échantillon, nous n'avons pas intégré ce facteur dans la construction de l'indice de vulnérabilité totale.

L'étude de la **vulnérabilité totale** permet de prendre en compte les différentes vulnérabilités étudiées (fonctionnelle, physique, population) sous la forme d'une indice (équ. 2.11),

qui correspond à la somme des dites vulnérabilités. En effet, chaque modalité (faible, faible à moyenne, moyenne à élevée, élevée) a été codée par un chiffre variant entre 1 et 4. Ils ont été ensuite additionnés. Nous avons préféré la somme à la moyenne, qui lisserait les valeurs extrêmes, car l'indice synthétique se veut majorant (les facteurs de vulnérabilité sont aggravants et se cumulent entre eux :

$$V_{ti} = \sum (V_{fi}, V_{hi}, V_{\varphi i}, V_{di}) \quad (2.11)$$

avec V_{ti} la vulnérabilité totale du i^{e} bâtiment, V_{fi} sa vulnérabilité fonctionnelle, V_{hi} sa vulnérabilité liée à sa hauteur, $V_{\varphi i}$ sa vulnérabilité physique aux séismes et V_{di} sa vulnérabilité liée à la densité de population de l'unité de recensement dont il fait partie.

Chaque valeur d'indice de vulnérabilité totale obtenue est remplacée par un qualificatif symbolisant le niveau de vulnérabilité (nulle, faible, faible à moyenne, moyenne à élevée, élevée) :

- $V_{ti} = 0$: vulnérabilité nulle ;
- $V_{ti} < 4$: vulnérabilité faible ;
- $4 \leq V_{ti} < 7$: vulnérabilité faible à moyenne ;
- $7 \leq V_{ti} < 11$: vulnérabilité moyenne à élevée ;
- $V_{ti} \geq 11$: vulnérabilité élevée.

Par exemple, un bâtiment résidentiel de hauteur égale à 30 m, dont l'écart Δf_0 est égal à 1.5 Hz et qui est localisé dans un îlot de densité de population égale à 56 000 hab./km² (cf. § 3.2.4.2 ⁶¹) sera caractérisé par les vulnérabilités suivantes :

- vulnérabilité fonctionnelle : faible ; $V_{fi} = 1$;
- vulnérabilité due à sa hauteur : élevée ; $V_{hi} = 2$ ⁶² ;
- vulnérabilité physique : moyenne ; $V_{\varphi i} = 3$;
- densité de population : élevée ; $V_{di} = 4$.

On obtient alors $V_{ti} = 1 + 2 + 3 + 4 = 10$, ce qui correspond à une vulnérabilité moyenne à élevée.

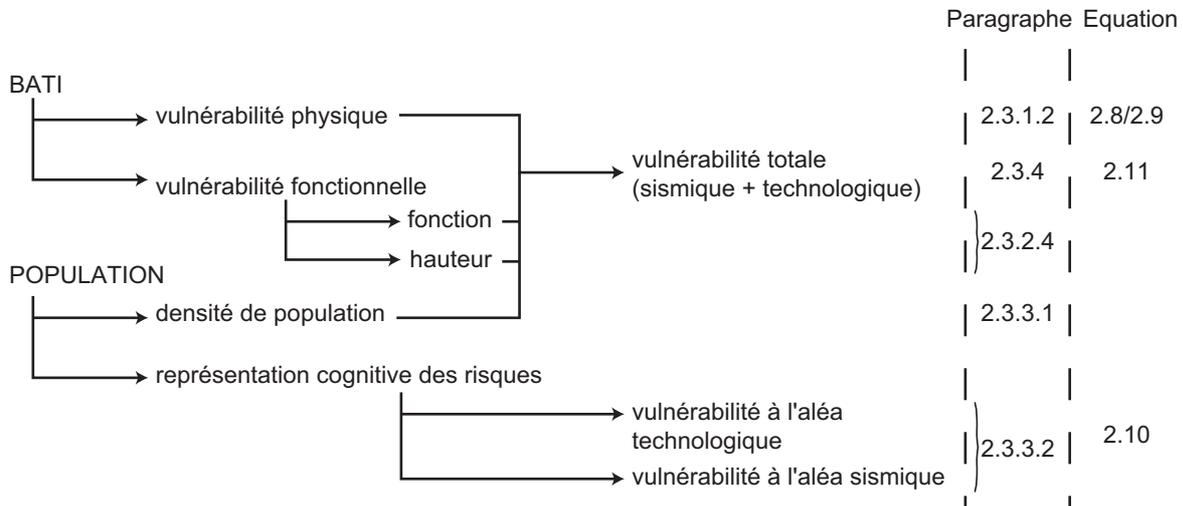
L'indice de vulnérabilité élaboré ici synthétise les informations sur le bâti (vulnérabilités physique et fonctionnelle) et la population (densité). Pour en faciliter la représentation et l'interprétation, l'indice est cartographié à l'échelle du bâtiment.

⁶¹Les classes de densité de population n'ont pas encore été présentées ici car elles dépendent des valeurs de densité rencontrées dans la région d'étude. Pour cet exemple, nous nous appuyons sur l'exemple de Mulhouse.

⁶²Nous considérons que la hauteur du bâtiment constitue un facteur aggravant mais non déterminant de la vulnérabilité, c'est pourquoi nous affectons aux IGH une valeur de 2 pour signifier une vulnérabilité élevée (et non une valeur de 4 comme c'est le cas des autres vulnérabilités).

2.3.5 Conclusion : méthodologie de caractérisation de la vulnérabilité

La méthode de caractérisation des vulnérabilités peut être résumée par la figure 2.19.



E. Beck, 2006, Laboratoire Image et Ville, Institut de Physique du Globe de Strasbourg

FIG. 2.19 – Méthodologie de caractérisation de la vulnérabilité du bâti et de la population : en ce qui concerne le bâti, la vulnérabilité physique et la vulnérabilité fonctionnelle (qui prend en compte la fonction principale du bâtiment et sa hauteur) sont évaluées ; puis, la vulnérabilité de la population prend en compte d'une part la densité de population, d'autre part la représentation cognitive des risques. Les données de vulnérabilité physique, fonctionnelle, de hauteur du bâti et de densité de population sont synthétisées en un indice de vulnérabilité totale, ramenée au bâtiment.

2.4 Interactions entre risques sismique et technologiques

La démarche intégrée signifie bien que les composantes aléa et vulnérabilité sont prises en compte conjointement : à présent que les méthodologies d'évaluation des aléas sismique et technologiques et des vulnérabilités des différents éléments exposés ont été décrites, nous allons en faire la synthèse pour aboutir à des cartes de risque sismique et de risques technologiques. Après avoir étudié les risques, il conviendra d'en analyser les interactions. L'ensemble des données collectées, créées et validées ont été intégrées dans un système d'information géographique, qui constituera au final un double outil de représentation et d'aide à la décision. Le premier paragraphe de cette section consistera en un rappel des avantages de l'outil SIG pour l'étude des risques.

2.4.1 SIG et risque sismique

Analyser et cartographier le risque signifie associer l'aléa et la vulnérabilité sur un document synthétique. Dans notre cas, analyser le risque sismique consiste à identifier les secteurs cumulant vulnérabilité physique du bâti et aléa sismique ou secteurs d'effets de site marqués. Selon nous, l'analyse du risque sismique, dans le cadre de ce travail, peut être effectuée selon l'une des deux approches décrites ci-dessous :

1. en se concentrant sur la **vulnérabilité** : il s'agit de localiser les bâtiments et les réseaux les plus vulnérables d'un point de vue physique, fonctionnel et densité de population puis d'analyser l'aléa sismique et les effets de site auxquels ils sont exposés (sont-ils situés dans des secteurs où l'amplification potentielle des ondes à la fréquence de résonance est élevée ? sont-ils localisés à proximité d'une faille active ?) ;
2. en se concentrant sur l'**aléa** : tout d'abord, on localise les failles actives et les secteurs d'effets de site marqués, puis on analyse les bâtiments et réseaux situés dans ces secteurs (s'agit-il de bâtiments sensibles d'un point de vue densité de population ? d'ERP ? d'instances dirigeantes ? d'hôpitaux ? de bâtiments de vulnérabilité physique élevée ? de réseaux importants pour le fonctionnement de la ville ? y a-t-il concordance entre les bâtiments de vulnérabilité physique élevée et les bâtiments sensibles ?).

L'analyse spatiale permet de répondre à ces questions par la superposition et la mise en relation des couches de bâti, de densité de population, d'effets de site et de failles actives.

2.4.2 SIG et risques technologiques

Une simple superposition des couches ne correspond pas réellement à une carte de risque. Pour parvenir à un tel document, il convient d'opérer un croisement entre les données d'aléa et celles de vulnérabilité. Nous avons proposé une échelle d'aléa à quatre niveaux (faible, faible à moyen, moyen à élevé, élevé ; cf. § 2.2.1) et la même échelle pour la vulnérabilité totale (cf. § 2.3.4), que nous croisons en une clé de détermination à cinq niveaux (tab. 2.10). Les clés de détermination sont des tableaux permettant de quantifier le risque en fonction de niveaux d'aléa et de vulnérabilité [Manche, 1998, *in* Gleyze, 2002]. Nous obtenons une échelle de cinq niveaux de risque technologique : faible, faible à moyen, moyen, moyen à élevé et élevé. Un sixième niveau de risque correspond au risque nul, lorsque le niveau d'aléa ou de vulnérabilité est nul.

Risque (aléa, vulnérabilité)	Aléa faible	Aléa faible à moyen	Aléa moyen à élevé	Aléa élevé
Vulnérabilité faible	Faible	Faible	Faible à moyen	Moyen
Vulnérabilité faible à moyenne	Faible	Faible à moyen	Moyen	Moyen à élevé
Vulnérabilité moyenne à élevée	Faible à moyen	Moyen	Moyen à élevé	Élevé
Vulnérabilité élevée	Moyen	Moyen à élevée	Élevé	Élevé

TAB. 2.10 – Clé de détermination du risque à cinq niveaux. Le niveau de risque est obtenu par le croisement des niveaux d'aléa et des niveaux de vulnérabilité.

L'étude des risques technologiques consiste à combiner les informations issues de l'analyse de l'aléa technologique, à savoir l'exposition simple et l'exposition cumulée (qualitative et quantitative), avec la vulnérabilité des bâtiments, des réseaux et de la population. Trois approches sont envisageables selon que l'on combine ou non les données d'aléa et de vulnérabilité à l'aide de la clé de détermination ou selon que l'on se contente de les superposer :

1. en se concentrant sur la **vulnérabilité** : il s'agit de localiser les réseaux et les bâtiments les plus vulnérables d'un point de vue physique, fonctionnel et densité de population puis d'analyser le niveau d'aléa technologique auxquels ils sont exposés (sont-ils localisés dans des secteurs d'aléa élevé ? moyen à élevé ?...);
2. en se concentrant sur l'**aléa** : on localise les secteurs d'aléa technologique élevé puis on analyse les caractéristiques des bâtiments et des réseaux situés dans les secteurs (s'agit-il de bâtiments sensibles d'un point de vue densité de population ? d'ERP ? d'instances dirigeantes ? d'hôpitaux ? d'IGH ? de réseaux importants pour le fonctionnement de la ville ?...);
3. en étudiant le **risque** : quelle est la proportion de surface concernée par le risque technologique élevé, par rapport à l'ensemble de la zone d'étude ? où sont localisés les secteurs de risque technologique élevé ? moyen à élevé ?...

Dans un objectif opérationnel d'aménagement urbain, la même démarche peut être menée avec les zones non construites (espaces vides). En effet, il est important de savoir si les secteurs où de nouvelles constructions sont envisagées sont exposés ou non à des aléas naturels ou technologiques. De cette analyse peut dépendre aussi le choix du type de construction et plus précisément de leur fonction.

Les risques technologiques étant localisés (points sources et enveloppes), contrairement au risque sismique, susceptible d'être multi-localisation à l'échelle d'une agglomération, une confrontation entre cartographie du risque réel et cartographie du risque perçu peut être réalisée. Ces cartes permettent d'identifier des phénomènes et des facteurs de sous- ou surestimation des risques : il y a sous-estimation si le risque existe mais qu'il n'est pas perçu, surestimation dans le cas où les habitants se sentent exposés à un risque alors que ce n'est pas le cas en réalité.

2.4.3 Analyse des interactions entre risques

On l'a vu dans les deux paragraphes précédents, l'analyse des risques fait beaucoup appel à la représentation et à l'analyse spatiale. Il en va de même pour l'analyse des interactions entre risques sismique et technologiques. En effet, les techniques d'analyse spatiale, et plus particulièrement celles des SIG, permettent d'identifier les interactions entre aléas et les conséquences sur les éléments vulnérables.

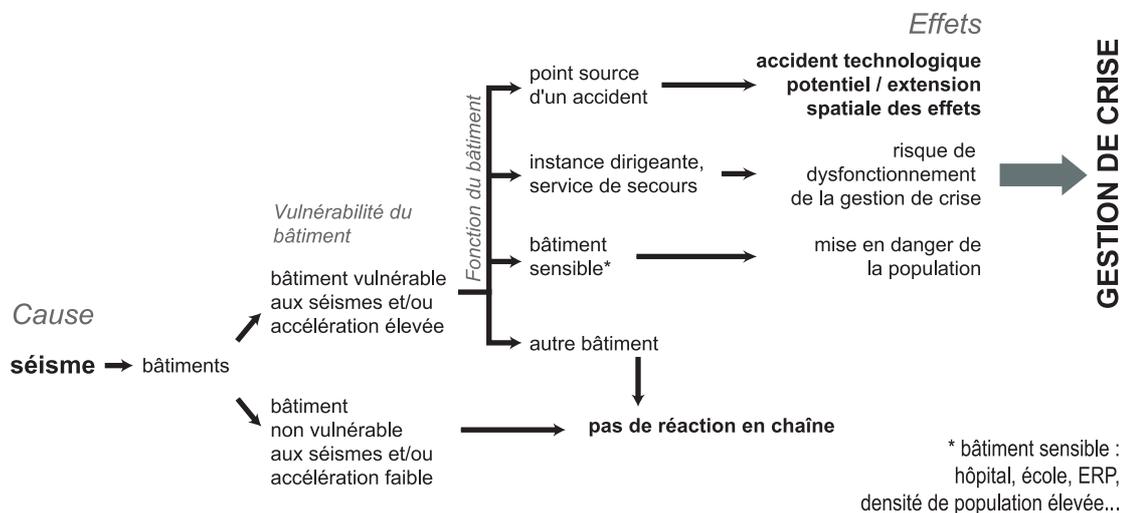
Deux catégories de réactions en chaîne peuvent se produire. D'une part, des accidents technologiques consécutifs à un tremblement de terre, d'autre part des effets dominos entre accidents technologiques d'un même site ou de sites différents.

2.4.3.1 Interactions entre risques sismique et technologiques

Les interactions entre les deux catégories de risques peuvent être identifiées à partir du moment où une catastrophe, en l'occurrence un tremblement de terre, est simulée et lorsque des éventuelles réactions en chaîne sont observées.

Analyser les interactions entre différents types de risques, c'est reconnaître les réactions en chaîne qui peuvent se produire. Dans ce travail, ce sera identifier si les bâtiments correspondant à des points sources d'un accident technologique sont vulnérables aux séismes (si leur vulnérabilité physique est élevée) et s'ils sont localisés dans des secteurs d'effets de site marqués et d'accélération élevée pour le scénario sismique considéré. Si tel est le cas, alors des effets dominos suite à un tremblement de terre peuvent être redoutés.

La figure 2.20 synthétise la démarche d'analyse des risques et des interactions entre risques sismique et technologiques.



E. Beck, 2006, Laboratoire Image et Ville, Institut de Physique du Globe de Strasbourg

FIG. 2.20 – Procédure d'analyse des interactions entre risques sismique et technologiques. La résistance d'un bâtiment aux secousses sismiques et sa fonction jouent un rôle important dans l'analyse des interactions potentielles et des conséquences en termes de gestion de crise.

2.4.3.2 Interactions entre risques technologiques

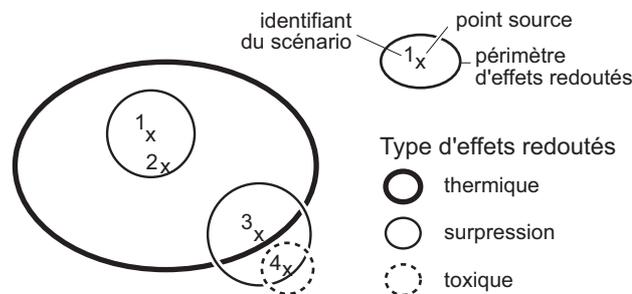
L'analyse des réactions en chaîne entre plusieurs entreprises dangereuses ou au sein d'une même entreprise fait également appel à l'analyse spatiale. Des effets dominos peuvent être identifiés dès lors que le centre d'une enveloppe (point source) se trouve à l'intérieur d'une seconde enveloppe dont les effets redoutés sont thermiques ou de surpression (fig. 2.21). En effet, pour qu'une réaction en chaîne ait lieu, il faut que les structures (bâtiments, réservoirs, conduites) soient fragilisées ou même détruites par un incendie, une explosion ou un séisme. C'est pourquoi nous considérerons que seuls les scénarios de type thermique ou de surpression peuvent être à l'origine d'une réaction en chaîne.

Bien entendu, le type d'effet importe mais la chronologie de l'accident est fondamentale car, en fonction de l'ordre dans lequel se produisent les accidents, les réactions en chaîne

ne sont pas nécessairement les mêmes. Dans l'exemple de la figure 2.21, si un accident survient en premier lieu sur le point source 3 d'enveloppe 3, comme le point source 4 se trouve à l'intérieur de l'enveloppe 3, qui représente l'extension spatiale des effets redoutés, une réaction en chaîne est à craindre, puisque l'accident originel est de type "surpression". Si l'accident survient en premier lieu au point source 4, des effets dominos ne sont *a priori* pas susceptibles de se produire car le point source 4 est à l'extérieur de l'enveloppe 3.

Deux étapes permettent de faire l'inventaire des réactions en chaîne potentielles.

Dans un premier temps, on peut lister les réactions en chaîne potentielles pour chaque scénario (tab. 2.11). Ces réactions en chaîne correspondent aux scénarios dont le point source est localisé dans l'enveloppe du scénario de départ. Dans notre cas théorique, si le scénario de départ est le numéro 2, son enveloppe englobe les points sources des scénarios 1 et 3. Ainsi, dans la situation la plus pénalisante, l'accident 2 peut induire les accidents 1 et 3 (tab. 2.11).



E. Beck, 2006, Laboratoire Image et Ville, Institut de Physique du Globe de Strasbourg

FIG. 2.21 – Schéma théorique de plusieurs scénarios d'accidents. Un site dangereux peut faire l'objet de plusieurs scénarios d'accident, susceptibles d'interagir entre eux (effets dominos). Des interactions peuvent également être observées entre scénarios de sites dangereux différents.

Scénario	Type d'effets	Réactions en chaîne potentielles (n° des scénarios)
1	Surpression	2
2	Thermique	1, 3
3	Surpression	4
4	Toxique	/

TAB. 2.11 – Réactions en chaîne potentielles pour chaque scénario (cas théorique de la figure 2.21). Si le scénario 2 advient, il peut entraîner les scénarios 1 et 3 et par voie de conséquence le 4 car le point source 4 est contenu dans l'enveloppe 3.

Le tableau ne permet de représenter que les réactions en chaîne que nous qualifions de “premier **niveau**”, c’est-à-dire les accidents potentiels générés par un seul scénario à la fois. Dans notre exemple quatre interactions de niveau 1 sont observées ⁶³ : $1 \rightarrow 2$; $2 \rightarrow 1$; $2 \rightarrow 3$; $3 \rightarrow 4$. Ces réactions apparaissent comme trois sous-systèmes indépendants, alors que des interactions existent entre eux. Un effet dominos de deuxième niveau va prendre en compte des interactions supplémentaires et considérer davantage de réactions en chaîne. Dans notre exemple, deux effets dominos de niveau 2 sont observés : $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$; $2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$. Le **niveau maximal** d’effets dominos de cet exemple est le troisième niveau, puisque l’on peut observer la réaction en chaîne 1 entraîne 2 qui entraîne 3 qui entraîne 4. Le niveau maximal des effets dominos identifiés en un site indique la complexité des réactions du site : plus le niveau est élevé, plus la gestion des effets dominos est complexe, plus la crise peut être grave.

Dans un deuxième temps, à partir des données du tableau, on peut représenter sous forme de schéma les réactions en chaîne qui sont susceptibles de se produire (fig. 2.22). Son inconvénient majeur est qu’il peut très vite devenir complexe si le nombre de scénarios est important. Par contre, l’avantage est qu’il permet de représenter des niveaux d’effets dominos supérieurs à un et que l’on peut identifier rapidement les potentielles réactions en chaîne. Pour reprendre notre exemple théorique, si le scénario 1 se produit, on saura grâce à ce schéma, en suivant les flèches, que les accidents 2, 3 et 4 sont susceptibles de se produire.

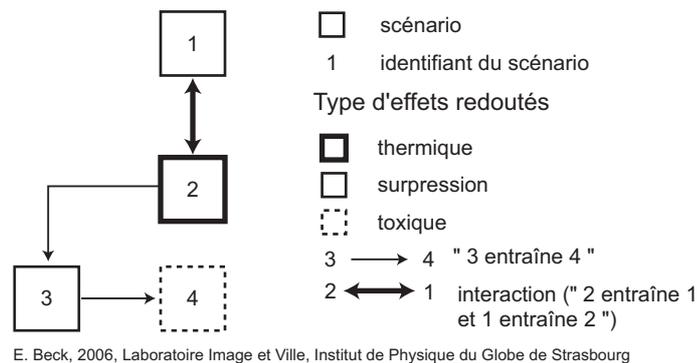


FIG. 2.22 – Schéma des réactions en chaîne potentielles dans le cas théorique représenté sur la figure 2.21. Ce schéma identifie l’ensemble des réactions en chaîne susceptibles de se produire : si le scénario 1 se produit, les accidents 2, 3 et 4 peuvent survenir.

Cette méthode illustre les situations les plus pénalisantes car elle ne prend pas en compte les effets de barrière induits par les bâtiments, les systèmes de protection mis en place par les industriels pour éviter ces réactions en chaîne, l’atténuation des effets avec la distance, qui éliminerait certaines réactions en chaîne, etc.

Nous avons proposé une méthodologie intégrée permettant d’analyser les réactions entre risques sismique et technologiques. Cette méthode nécessite, à chaque étape, d’avoir recours à des données. Certaines d’entre elles sont disponibles, une partie peut être collectée auprès de différents organismes et d’autres enfin doivent être créées ⁶⁴. L’inventaire des données nécessaires à la méthode mise en place dans le cadre de cette thèse va être à présent décrit,

⁶³Une flèche signifie “entraîne”. Exemple : $1 \rightarrow 2$ signifie “1 entraîne 2”, autrement dit que le scénario 1 peut entraîner l’occurrence du scénario 2.

⁶⁴Le terme “données créées” est employé ici dans le sens de données non existantes mais représentatives d’un phénomène et susceptibles d’être “fabriquées”.

tout comme les différentes opérations auxquelles il faut procéder dans le but de les intégrer dans le SIG.

2.5 Données

L'étude des risques de nature différente et par l'intermédiaire d'un SIG nécessite incontestablement l'intégration de données diverses, dont il faut préalablement faire l'inventaire (données nécessaires, cf. § 2.5.1). Une partie de ces données sont généralement déjà disponibles (cf. § 2.5.2), mais il est souvent nécessaire de faire appel à des organismes variés, eux-mêmes générateurs de données (cf. § 2.5.3), ou alors de les créer soi-même si leur précision, leur mise à jour, leur échelle ou leur richesse attributaire ne sont pas adaptées à l'étude (cf. § 2.5.4).

2.5.1 Données nécessaires

Les données nécessaires à l'étude des risques sismique et technologiques peuvent être classées en quatre catégories : données portant sur l'aléa sismique, celles se rapportant à l'aléa technologique, celles en relation avec la vulnérabilité et des données diverses dites données d'habillage (cours d'eau, altimétrie...) servant principalement au repérage.

2.5.1.1 Données portant sur l'aléa sismique

La connaissance de l'aléa sismique nécessite d'avoir accès aux données de sismicité historique et instrumentale et à la localisation des failles actives :

- **sismicité historique** : la sismicité historique correspond aux séismes du passé dont il est fait mention dans les archives. Ils sont décrits par une latitude, une longitude, une intensité macrosismique, une date d'occurrence et une localisation approximative (tab. 2.12) ;

Date	Latitude	Longitude	Intensité	Localisation approximative
18/10/1356	47.52	7.55	IX	Suisse
27/12/1523	48.00	7.87	VI-VII	Allemagne
16/05/1650	47.55	7.60	VI	Suisse
21/09/1650	47.55	7.60	VI-VII	Suisse
10/10/1669	48.58	7.75	VI	Alsace
12/05/1685	47.97	6.52	VIII	Vosges
26/11/1716	47.00	6.98	V	Suisse

TAB. 2.12 – Extrait de la sismicité historique du Fossé Rhénan (source : SiSFrance). Ce tableau décrit notamment le séisme le plus important qu'ait connu le sud du Fossé Rhénan Supérieur, celui du 18/10/1356 et dont aucun équivalent ne s'est produit depuis. L'intensité indiquée correspond à l'intensité maximale déterminée à proximité de l'épicentre.

- **sismicité instrumentale** : ensemble des tremblements de terre régionaux enregistrés par les sismomètres des réseaux de surveillance permanents. Un séisme est caractérisé par sa localisation (latitude, longitude), sa profondeur du foyer, sa magnitude, son heure et sa date d'occurrence et une indication de région ou de ville permettant un repérage approximatif de la région dans laquelle il s'est produit (SE Colmar, N Strasbourg...);
- **failles actives** : il nous faudra connaître la localisation des failles actives, leur type (visible, masquée ou supposée), leur segmentation, leur longueur, qui informe sur la magnitude maximale des séismes desquels elles peuvent se trouver à l'origine.

L'étude des effets d'un séisme nécessite de connaître également les données suivantes :

- **loi d'atténuation** : la loi d'atténuation détermine la façon dont l'amplitude des ondes sismiques va s'atténuer en fonction de la distance à l'épicentre et dans un contexte tectonique donné. Par exemple, une loi d'atténuation calculée pour l'ouest des États-Unis ne sera pas valable dans l'Est de la France ;
- **effets de site** : les effets de site, localisés, sont décrits par une fréquence fondamentale de résonance et un facteur d'amplification des ondes à cette fréquence ;
- **géologie de surface** : la carte géologique permet d'avoir une information spatialisée sur la lithologie (nature) et la stratigraphie (âge) de la géologie de surface ;
- **forages** : les forages, plus ou moins profonds (forages pétroliers ou sondages divers), permettent d'obtenir une information ponctuelle sur l'épaisseur des couches superposées, sur leur lithologie et sur leur stratigraphie. Les forages sont rassemblés dans la BSS (banque de données du sous-sol) gérée par le BRGM ;
- **vitesse des ondes de cisaillement (ondes S) des couches géologiques de surface** : paramètre géomécanique des sols obtenu par SASW.

2.5.1.2 Données en lien avec l'aléa technologique

Les données relatives à l'aléa technologique portent sur les scénarios décrits par les extraits des études de danger. Il s'agit plus précisément du nom de l'entreprise dangereuse considérée, du rayon de la surface correspondant à l'extension spatiale des effets redoutés, du type d'effets redoutés et du nom du bâtiment correspondant au point source du scénario.

Les plans de masse et le descriptif du PPI constituent également des documents nécessaires pour pouvoir repérer avec exactitude les bâtiments correspondant aux points sources des scénarios. Enfin, il nous faut connaître les lois d'atténuation des effets des accidents technologiques avec la distance pour mener à bien la méthodologie proposée dans ce travail.

2.5.1.3 Données portant sur la vulnérabilité des éléments exposés

Les données relatives aux éléments exposés sont de trois ordres : les infrastructures (bâti, surfaces non construites et réseaux), les espaces vides et la population (densité et représentation cognitive).

Les infrastructures sont d'une part les bâtiments (sous-entendu les constructions), les surfaces non construites et les réseaux :

- **bâtiments** : les données se rapportant aux bâtiments consistent d'une part en la géométrie des bâtiments et en leur localisation, d'autre part en quelques attributs les décrivant : surface (pour le calcul de la surface réelle bâtie), hauteur, fonction. Il convient également de pouvoir localiser les ERP et les établissements accueillant une population sensible (cf. § 2.3.2.4) ;
- **surfaces non construites** : leur géométrie, leur localisation et leur nature (cimetières, parcs de stationnement, stades, courts de tennis, etc.) constituent les données nécessaires ;
- **réseaux** : bien que la vulnérabilité des réseaux ne soit pas évaluée dans le cadre de ce travail, il est primordial de pouvoir localiser les axes de communication les plus importants, qu'il s'agisse des axes routiers ou des axes ferrés, les lignes téléphoniques, les conduites de gaz, etc. ;

Les espaces vides correspondent aux secteurs non bâtis ou non occupés par des réseaux (de transport ou hydrographiques). On peut les caractériser à l'aide d'images satellites (traitements d'images) ou de photographies aériennes (photo-interprétation) afin de savoir s'il s'agit de friches industrielles, de forêts, de champs, etc.

La population est abordée sous deux angles différents, d'une part la densité de population, d'autre part sa représentation cognitive des risques :

- **population** : la méthode de calcul de la densité de population proposée dans le cadre de notre travail nécessite d'avoir accès d'une part aux effectifs de la population recensée par l'INSEE en 1999, d'autre part aux découpages administratifs des communes (découpage par îlot, par IRIS, limites de communes) ;
- **représentation cognitive des risques par la population** : les données relatives à la représentation cognitive des risques par la population sont obtenues par l'intermédiaire d'enquêtes par questionnaire.

Le tableau 2.13 résume l'ensemble des données nécessaires à l'étude ainsi que leurs attributs.

2.5.1.4 Données diverses

Quelques données non liées à la problématique des risques permettent de se repérer et d'habiller les cartes :

- **altimétrie** : sous forme de courbes de niveau ou d'un modèle numérique de terrain ;
- **réseau hydrographique** : principaux cours d'eau et surfaces hydrographiques ;
- **forêt** : étendues forestières ou parcs urbains ;
- **orthophotos** : les orthophotographies permettent de se repérer dans l'espace urbain et de caractériser certains quartiers en fonction du type de bâti.

Le tableau 2.14 synthétise les données utilisées pour le repérage et l'habillage des cartes.

Thème	Couche (ou autre donnée)	Type de données	Localisation	Attributs
Aléa/risque sismique	Sismicité historique	Couche (points)	Latitude, longitude (°)	Intensité macrosismique, date, localisation approximative
	Sismicité instrumentale	Couche (points)	latitude, longitude (°)	Magnitude, date, heure origine (TU), région
	Failles	Couche (polylignes)	x,y (Lambert II étendu)	Type (visible, masquée ou supposée), longueur
	Géologie de surface	Image	x,y (Lambert II étendu)	Lithologie, stratigraphie
	Effets de site	Couche (points), spectres (graphiques) et grille	latitude, longitude (°)	Identifiant, fréquence fondamentale, amplification
	Forages	Couche (points)	x,y (Lambert II étendu)	Identifiant, profondeurs, épaisseurs, lithologie, stratigraphie
	Vitesses des ondes S	Couche (points) et profils (graphiques)	x,y (Lambert II étendu)	Identifiant, valeur de vitesse déduite de l'interprétation des profils SASW
	Loi d'atténuation	Formule	/	/
Aléa technologique	Scénarios des études de danger	Couche (points et polygones)	x,y (Lambert II étendu)	Industrie, effet redouté, rayon de l'étendue des effets, nom du bâtiment point source
Éléments exposés	Bâtiments	Couche (polygones)	x,y (Lambert II étendu)	Surface, hauteur, fonction
	Surfaces non construites	Couche (polygones)	x,y (Lambert II étendu)	Fonction
	Effectifs de population	Table	/	Données de recensement par ilot, IRIS ou commune*, identifiant de l'unité de recensement correspondante
	Découpage en ilots	Couche (polygones)	Couche (polylignes)	Numéro de l'ilot
	Découpage en IRIS	Couche (polygones)	x,y (Lambert II étendu)	Numéro de l'IRIS
	Limites de communes	Couche (polygones)	x,y (Lambert II étendu)	Nom de commune
	Indice de vulnérabilité de la population par quartiers	Couche (points puis polygones) et enquêtes	x,y (Lambert II étendu)	Valeurs d'indices de vulnérabilité liés à la représentation cognitive (indice pour l'aléa sismique et indice pour l'aléa technologique)
	Réseaux ferrés	Couche (polylignes)	x,y (Lambert II étendu)	/
	Réseaux routiers	Couche (polylignes)	x,y (Lambert II étendu)	Type

* Selon les communes, la population est renseignée par ilot, IRIS ou pour l'ensemble de la commune.

TAB. 2.13 – Ensemble des données sélectionnées pour l'étude des interactions entre risques sismique et technologique.

Sous-thème	Type de données	Localisation	Attributs
Altimétrie	Couche (polylignes) et grille (MNT)	x,y (Lambert II étendu)	Altitude
Réseau hydrographique	Couche (polygones et polylignes)	x,y (Lambert II étendu)	/
Forêts	Couche (polygones)	x,y (Lambert II étendu)	/
Orthophotos	Images	x,y (Lambert II étendu)	/

TAB. 2.14 – *Données utilisées pour l'habillage et le repérage.*

2.5.2 Données disponibles

Les laboratoires au sein desquels cette recherche a été menée disposent d'un certain nombre de données issues de contrats antérieurs ou des compétences et savoir-faire respectifs.

L'Institut de Physique du Globe de Strasbourg, via le RéNaSS, a ainsi mis à disposition des données relatives à la sismicité historique et instrumentale. Ces données sont continuellement mises à jour.

Le Laboratoire Image et Ville possède la BD Carto® de l'IGN, un modèle numérique de terrain généré dans le cadre de l'élaboration de l'atlas climatique REKLIP ⁶⁵ [REKLIP, 1996], ainsi que les données de recensement de 1999 de l'INSEE.

2.5.3 Données collectées

Cette étude a nécessité la collecte de nombreuses données multi-sources, d'échelle et de précision variables, qu'il a fallu pour la plupart affiner et améliorer. Des données nous ont été fournies par plusieurs partenaires du projet Interreg III ⁶⁶, elles-mêmes ayant été générées par des organismes différents sur des objectifs distincts (cadastre, BD Topo®, BSS, etc.). Le tableau 2.15 décrit les données collectées auprès de ces organismes.

Comme on peut le constater, les organismes auprès desquels les données ont été collectées sont variés ; il en résulte une hétérogénéité des échelles, des richesses attributaires, etc. comme le montre le tableau 2.16. Seul un extrait des données collectées est décrit dans ce tableau. La zone géographique couverte varie d'une couche (ou ensemble de couches) à une autre : certaines ne concernent que la ville de Mulhouse (cadastre), d'autres l'ensemble de l'Alsace et des régions limitrophes (sismicité). Une partie des données sont caractérisées par un système de coordonnées géographiques (latitudes, longitudes) alors que la majorité d'entre elles sont projetées en Lambert II étendu. Enfin, la date de création des données et surtout la date de leur dernière mise à jour diffère grandement d'une couche (ou ensemble de couches) à une autre, ce qui est particulièrement gênant pour les données de bâti, qui évoluent constamment. Par exemple, la dernière mise à jour des données du cadastre date de 2001 alors que celle de la BD Topo®, date de 2004. Par ailleurs, les effectifs de population correspondent au recensement de 1999.

⁶⁵REgio KLima Project (1990-1997) : ce projet transfrontalier, portant sur le Fossé Rhénan méridional, avait pour objectif d'étudier les aspects physiques et climatologiques du comportement de la couche limite planétaire.

⁶⁶Microzonage de la région du sud du Rhin Supérieur, contrat Interreg III n°3c.8. Coordinateur scientifique : M. Granet.

Organisme ou source	Données collectées
BRGM	Banque de données du sous-sol
BRGM	Cartes géologiques scannées et géoréférencées (acquisition par l'IPGS)
Ville de Mulhouse	BD Topo®, BD Ortho®, cadastre (pour la commune de Mulhouse uniquement)
DRIRE	Extraits des études de danger, plans particuliers d'intervention
Projet Interreg III/BRGM	Mesures SASW

TAB. 2.15 – *Inventaire des données collectées auprès de différents organismes. La variété des organismes fournisseurs reflète l'hétérogénéité des données collectées.*

Notre méthode de calcul de la densité de population consiste à combiner des données de bâti et de population (cf. § 2.3.3.1). Il en résulte certaines incohérences pour combiner des données dont la date de création ou de mise à jour n'est pas la même. Par exemple, un des îlots étudiés est caractérisé par une densité de 1.6 hab./m² ce qui est irréaliste, connaissant les effectifs de population recensée (118 personnes) et la surface bâtie de cet îlot (un seul bâtiment de 112 m² dont la hauteur est de 4 m !). L'origine de cette incohérence n'est pas clairement identifiée mais elle provient certainement d'une différence d'effectifs de population entre 1999 et 2004 ou un changement important dans l'occupation du sol (bâtiments détruits entre ces deux dates).

Nous verrons dans le paragraphe 2.5.6 que l'hétérogénéité des données a requis de procéder à quelques traitements, dans l'objectif de gagner en homogénéité.

2.5.4 Données à créer

En définitive, malgré la multitude de données récupérées auprès du BRGM, de la DRIRE⁶⁷ ou de la Ville de Mulhouse, deux catégories de données ont dû être créées car elles n'existaient pas : il s'agit des effets de site et de la représentation cognitive des risques. Des campagnes de terrain ont été nécessaires dans les deux cas : une campagne de mesures de bruit et d'enregistrement des séismes pour estimer les effets de site, des enquêtes par questionnaire pour caractériser la représentation cognitive des risques.

2.5.5 Qualité des données, incertitudes des résultats

Tout résultat devrait être théoriquement accompagné d'une indication de son incertitude⁶⁸. Cependant, cette incertitude n'est pas toujours quantifiable, étant donné la multiplicité de ses origines.

⁶⁷Direction régionale de l'industrie, de la recherche et de l'équipement.

⁶⁸Selon les disciplines, le terme "erreur" est préféré à celui d'"incertitude". Dans ce cas, les erreurs portent sur les mesures, sur le modèle et ainsi sur les résultats. Dans le cadre de ce travail, nous avons choisi de prendre en considération le terme d'"incertitude".

Nom des données	Zone géographique couverte	Système de coordonnées	Echelle	Caractéristiques techniques	Date de création	Date de dernière mise à jour
BD Topo© (en partie)	Rectangle centré autour de Mulhouse (zone d'étude)	Lambert II étendu	1/10 000	61 couches regroupées en 4 catégories	1995	2001 (mises à jour ponctuelles)
BD Topo© (en partie)	Communes autour de Mulhouse	Lambert II étendu	1/10 000	11 couches	2004	2004
Cadastre	Ville de Mulhouse	Lambert II étendu	1/200	6 couches	Inconnue	2001
Forages	Communes autour de Mulhouse	Latitudes, longitudes	/	/	2002	/
Recensement	Alsace	Lambert II étendu	Ilots	/	1999	1999
			IRIS	/	1999	1999
Carte géologique géoréférencée	Sud du Fossé Rhénan	Lambert II étendu	1/50 000	44 dalles de 10km x 10km (équivalent de 5 feuilles)	1976	/
Sismicité historique	Alsace et régions limitrophes	Latitudes, longitudes	/	/	Inconnue	1994
Sismicité instrumentale	Alsace et régions limitrophes	Latitudes, longitudes	/	/	Dispo.*	Mise à jour continue

* Disponible depuis 1980 dans les fichiers du RéNaSS

TAB. 2.16 – *Descriptif des données collectées (extrait). Les données collectées font l'objet d'une grande hétérogénéité de couverture, de date de mise à jour, de structuration, etc.*

En modélisation géographique, les incertitudes interviennent dans les différentes étapes du cycle de vie d'une information (fig.2.23), du choix du modèle à la représentation des résultats. A chacune de ces phases, des erreurs peuvent être commises par l'analyste et, si elles ne sont pas corrigées ou minimisées, elles sont susceptibles de se propager au cours de l'analyse, depuis le choix de la théorie sur laquelle s'appuie le modèle jusqu'à la représentation des résultats : il en résulte une grande incertitude des résultats finaux. Ce schéma donne un aperçu de la multitude des sources d'incertitude, cependant, il omet une part importante de l'information géographique : les objets, tant leur localisation que leur géométrie. Nous verrons qu'il peut s'agir d'une source d'incertitude importante.

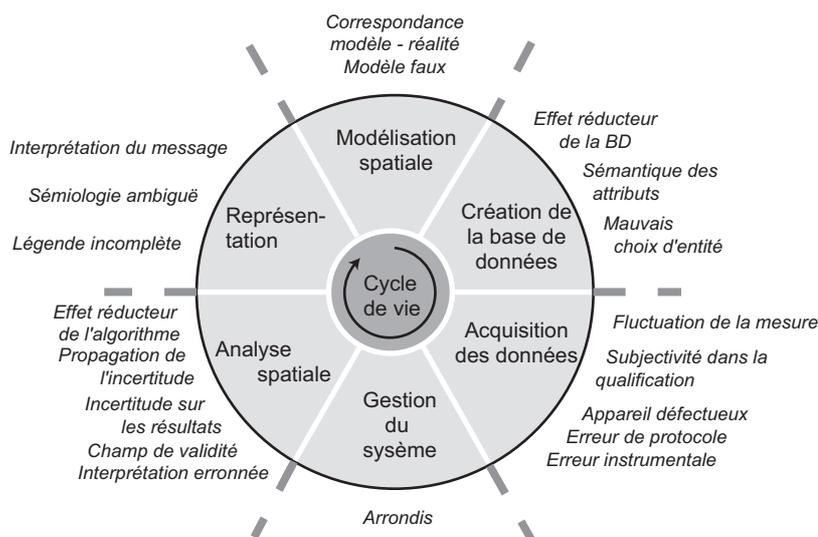


FIG. 2.23 – Cycle de vie d'une information dans les étapes de modélisation géographique (source : Caloz, 2006). L'information fait l'objet d'incertitudes, depuis le choix du modèle jusqu'à la représentation des résultats. Les incertitudes se propagent tout au long du cycle de vie de cette information.

D'une manière plus générale, les incertitudes des résultats d'une modélisation, qu'elle soit géographique ou non, peuvent provenir de trois origines : le modèle, les données et les résultats [Caloz, 2006]. Nous allons décrire chacune de ces trois sources d'incertitudes et illustrer nos propos à l'aide d'exemples issus de notre étude.

2.5.5.1 Incertitudes liées au modèle

Le monde réel est complexe. Pour mieux le comprendre, des modèles sont utilisés. Leur objectif est de représenter et d'expliquer une réalité permettant ensuite de prédire le comportement du système étudié. Ces modèles constituent par définition une simplification de la réalité, ce qui implique de faire des choix et de sélectionner les paramètres clés et la théorie retenue qui va relier le modèle et les données. Le simple fait d'écartier certains paramètres introduit une incertitude (ou une erreur) sur le modèle uniquement. La ville est un système complexe ; l'ensemble des éléments qui la composent (bâtiments, population, activités, flux...), ses densités, ses dimensions spatio-temporelles et sa taille lui confèrent une inertie importante qui la rend encore plus difficile à modéliser que d'autres systèmes. Sa représentation sous une forme simplifiée s'impose.

Dans notre cas, le calcul de la fréquence fondamentale des bâtiments est un exemple de résultat doté d'une grande incertitude, notamment en raison de la simplicité de la formule utilisée pour la calculer. Cette formule est basée sur un seul paramètre, le nombre d'étages, dont nous ne disposons pas. En revanche, nous disposons de données de hauteur de bâtiment et avons fait l'hypothèse qu'un étage possède une hauteur moyenne de 2.70 m. Le seul fait de prendre une valeur moyenne pour l'ensemble des bâtiments introduit déjà une incertitude. Puis nous avons considéré que le nombre d'étages était égal à la partie entière de la hauteur du bâtiment divisée par 2.70. Au final, le nombre d'étages est obtenu avec une incertitude de plus ou moins un étage, qui se répercute sur la valeur de la fréquence fondamentale du bâtiment. L'incertitude de la fréquence fondamentale est plus importante pour les bâtiments bas : pour un bâtiment de deux étages, on obtient une fréquence fondamentale de 5.00 Hz avec une marge d'erreur [3.33 - 10.00]⁶⁹, alors que pour un bâtiment de dix étages la fréquence obtenue est égale à 1 Hz avec une marge d'erreur [0.91 - 1.11]⁷⁰.

2.5.5.2 Incertitudes liées aux données

La qualité des données intégrées dans une analyse, qu'il s'agisse de données primaires (mesurées ou observées), dérivées (issues de traitements) ou interprétées (résultant de l'appréciation par un expert), dépend de plusieurs paramètres [Rouet, 1991] : leur précision, leur incertitude, leur date de mise à jour et leur représentativité.

– Précision des données

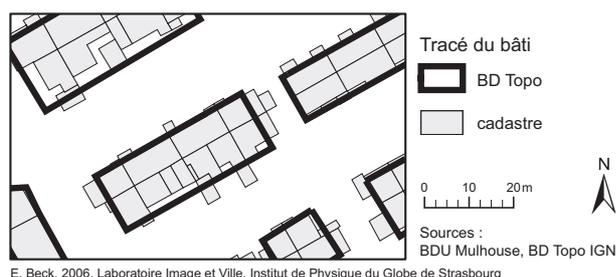
La **précision** d'une donnée géographique peut porter sur sa géométrie et ses attributs. La précision de la géométrie dépend de l'échelle d'acquisition des données : un bâtiment tracé à l'échelle du 1/200 aura la forme d'un polygone complexe (voire de plusieurs polygones), alors qu'il s'agira d'un rectangle lorsqu'il sera saisi à l'échelle du 1/10 000. L'échelle des données dépendant de l'objectif de l'étude, la représentation au 1/10 000 peut, selon le cas, s'avérer suffisamment précise.

Les différences de précision géométrique de la représentation du bâti d'après la BD Topo® et d'après le cadastre proviennent d'une différence d'échelle d'acquisition. En fait, les bâtiments représentés par la couche de bâti de la BD Topo® correspondent à une agrégation des bâtiments mitoyens et à la généralisation de leurs contours. Leur représentation est plus fidèle dans le cas des données du cadastre. La figure 2.24 illustre les différences de représentation pour un même objet. D'après la notice technique de la BD Topo®, la précision géométrique moyenne des bâtiments est de 1.2 m en planimétrie et 1 m en altimétrie [IGN, 2003]. C'est dans ce contexte que s'inscrivent les travaux d'A. Ruas (Laboratoire COGIT, IGN), dont l'objectif est d'intégrer des bases de données géographiques par généralisation et agrégation des objets [Ruas, 2004].

La précision d'un attribut numérique augmente avec son nombre de décimales. Un attribut textuel peut également s'avérer plus ou moins précis. Généralement, plus le nombre de modalités textuelles est élevé, plus la précision est grande : par exemple, "végétation" est moins précis que "prairie", "forêt de feuillus" ou "forêt de conifères".

⁶⁹Ces valeurs correspondent aux fréquences fondamentales de bâtiments d'un et trois étages.

⁷⁰Ces valeurs correspondent aux fréquences fondamentales de bâtiments de neuf et onze étages.



E. Beck, 2006, Laboratoire Image et Ville, Institut de Physique du Globe de Strasbourg

FIG. 2.24 – Précision inégale entre les données de bâti du cadastre et celles de la BD Topo®. Les bâtiments sont représentés par des polygones très détaillés dans la couche de cadastre, ils apparaissent sous la forme de rectangles dans la couche de la BD Topo®.

– Incertitude des données

L'**incertitude** des données géographiques peut porter sur l'objet lui-même (sa localisation) et sur ses attributs. L'exemple des failles illustre bien ce problème car une partie d'entre elles sont supposées (comme l'indique la carte géologique).

Dans le cas du calcul de la fréquence fondamentale des bâtiments, l'incertitude provient des données de hauteur et du mode de construction du bâtiment dont nous ne tenons pas compte. En effet, nous disposons de la couche "bâtiment" de la BD Topo®, qui comporte un champ "hauteur". Chaque ensemble de bâtiments mitoyens est doté d'une valeur de hauteur, arrondie au mètre et qui correspond à la hauteur au chéneau maximale du groupement de maisons [IGN, 2002]. Comme l'indique la figure 2.25, le petit bâtiment de droite n'est pas pris en compte. Il faudra donc considérer que les hauteurs peuvent être surestimées et qu'en conséquence les fréquences fondamentales de bâti sous-estimées.

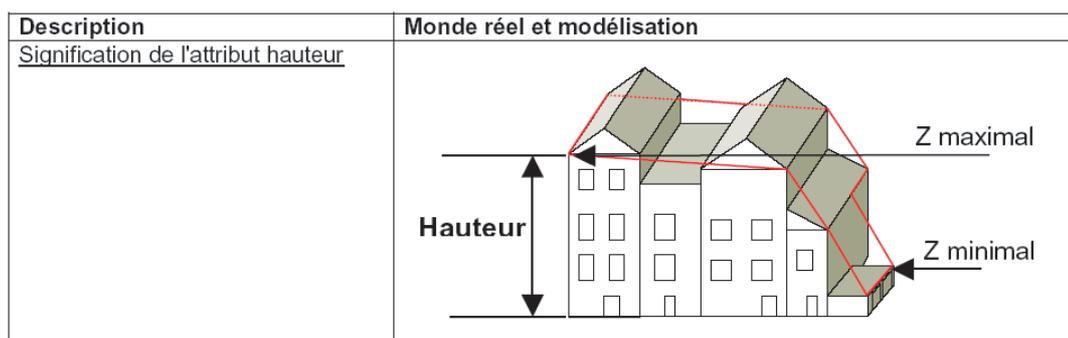


FIG. 2.25 – Attribut hauteur d'un ensemble de bâtiments, selon la BD Topo® (source : IGN, 2002). Chaque ensemble de bâtiments moyens se voit attribuer une seule et même valeur de hauteur, qui est égale à la hauteur au chéneau du plus haut des bâtiments.

Un autre exemple illustre les problèmes d'incertitudes de localisation, celui des limites des IRIS et des limites de communes. Ces incertitudes sont dues à des échelles d'acquisition et à des objectifs différents. Comme le montre la figure 2.26, les deux délimitations ne se superposent pas.

Les limites des communes proviennent de la BD Carto®, élaborée à l'échelle départementale et régionale, alors que les IRIS ont une échelle d'acquisition locale, même si les tracés

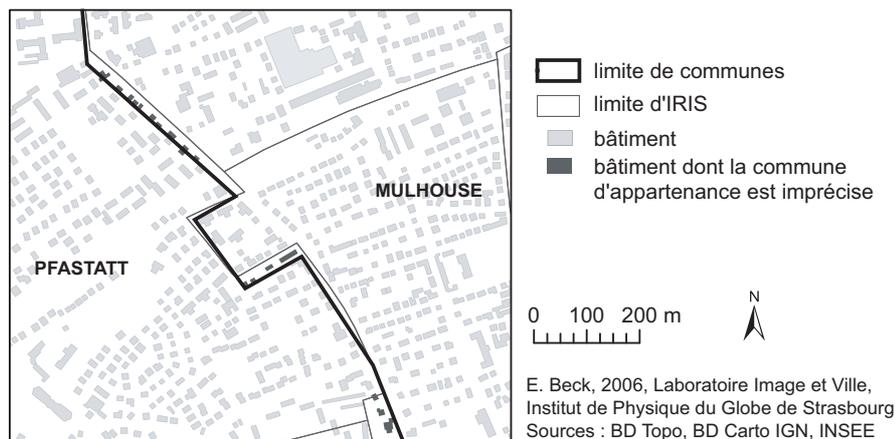


FIG. 2.26 – Localisation différente des limites de communes et des limites d'IRIS. Cette incertitude de localisation provient des différences d'échelle d'acquisition des données.

sont moins précis. La difficulté survient lorsque des bâtiments (indiqués en noir sur la figure 2.26) sont à la limite entre deux communes. Dans cet exemple précis, doivent-ils être comptabilisés comme étant situés sur le ban communal de Pfastatt ou celui de Mulhouse ? Cette question est d'autant plus importante que, comme nous l'avons proposé précédemment, les densités de population sont calculées à partir de la surface de bâti réelle de l'unité de recensement donnée (îlot, IRIS ou commune) et de la population résidante comptabilisée dans cette unité de recensement. Il est donc important de pouvoir attribuer à chaque bâtiment sa commune, son IRIS ou son îlot de rattachement. Cette opération devrait pouvoir être automatisée mais, dans notre cas, nous avons procédé à une correction manuelle en repérant les objets posant problème et en leur attribuant l'unité administrative la plus cohérente.

Les données mesurées⁷¹ sont caractérisées par des incertitudes (on parlera davantage d'erreurs que d'incertitude). L'erreur des mesures de bruit sismique est principalement liée à l'acquisition (système d'acquisition, sismomètre), aux erreurs de mesures (conditions dans lesquelles ces mesures ont été faites : site de mesure, conditions météorologiques...) et éventuellement au protocole.

– Date de mise à jour des données

La **date** de dernière mise à jour des données illustre également leur qualité. Lorsqu'il s'agit de données de topographie ou de géologie, on peut supposer qu'elles ont subi peu de modifications et qu'elles restent relativement fiables bien qu'elles aient été relevées il y a plusieurs dizaines d'années, même si les connaissances et les techniques d'acquisition ont évolué depuis. Le cas de l'occupation du sol, qui évolue constamment, est plus évocateur et exprime bien la nécessité de connaître la date de leur dernière mise à jour. Dans notre cas, les données de cadastre datent de 2001, celles de la BD Topo® de 2004, celles de recensement de 1999 et la carte géologique de 1976. Cet exemple illustre bien que les données sont hétérogènes, ce qui introduit des incertitudes (voire des aberrations) dans les résultats issus de leur combinaison.

⁷¹Par "donnée mesurée," nous entendons donnée acquise par un instrument de mesure (sismomètre par exemple), bien que l'on puisse considérer que l'ensemble des données (enquêtes, recensement, etc.) sont mesurées car relevant d'un protocole d'acquisition.

– Représentativité des données

La **représentativité** des données porte sur les objets ou sur leurs attributs. Il faut par exemple s'assurer que les données collectées couvrent l'ensemble de la zone d'étude. Par exemple, le descriptif technique de la BD Topo® indique une exhaustivité de 98 % du réseau routier revêtu, 99 % du réseau ferré, 95 % du bâti individuel et 98 % pour les autres bâtiments [IGN, 2003]. Cependant, leur objectif d'exhaustivité est plus faible pour les réservoirs, points d'eau, chemins et sentiers, zones arborées, etc. Les tables attributaires peuvent aussi être plus ou moins bien renseignées : dans notre cas, sur les 34 707 bâtiments de la zone d'étude, 4 235 d'entre eux sont dotés d'un attribut "fonction".

2.5.5.3 Incertitudes liées aux résultats

Les données collectées ou créées dans le cadre de ce travail font l'objet d'incertitudes. Le simple fait de les combiner, sachant qu'elles sont hétérogènes, d'échelles d'acquisition diverses, de richesse attributaire différente, etc., entraîne des incertitudes plus grandes sur les résultats, en raison de la propagation de celles-là tout au long de la chaîne de traitement. De plus, la phase d'interprétation des résultats constitue également une source d'incertitudes, si elle est réalisée par un expert, en raison des différentes interprétations basées sur des hypothèses diverses. L'exemple des fréquences fondamentales illustre bien la propagation des erreurs au cours des traitements. Rappelons que l'acquisition des données par la mesure génère déjà des erreurs. Ensuite, leur traitement introduit des erreurs statistiques. La précision des fréquences est liée à l'algorithme choisi (sept chiffres significatifs dans notre cas, mais arrondis à deux décimales pour l'interprétation) ; leur incertitude est également liée à la fréquence d'échantillonnage et à la longueur de la fenêtre temporelle utilisée pour le traitement, ainsi qu'à la taille de la fenêtre de lissage (nous avons opté pour une fenêtre proportionnelle à la fréquence considérée ; sa demi-longueur est égale à 10 % de la fréquence). La qualité du résultat obtenu peut être quantifiée à l'aide du calcul de l'écart-type, qui indique la dispersion des différents spectres des fenêtres de bruit par rapport à la moyenne de ceux-ci. Enfin, l'interprétation des rapports spectraux fait appel à l'expertise : les valeurs de fréquences fondamentales identifiées peuvent s'avérer différentes d'un expert à un autre. Ce biais reste cependant difficilement quantifiable.

Il existe des outils pour traiter ces incertitudes et imprécisions, comme par exemple le recours à la logique floue ou l'approche bayésienne [Dumolard, 2006 ; Caloz, 2006]. Plutôt que d'apporter une solution pour intégrer ces incertitudes dans le processus de modélisation, nous avons souhaité mentionner ici quelques exemples de données imprécises et incertaines qui nous incitent à considérer les résultats avec une certaine prudence et un regard critique.

2.5.6 Des données hétérogènes nécessitant des traitements dans l'objectif d'une intégration dans le SIG

Les données disponibles, collectées ou créées sont d'origines et de formes diverses. Nous avons été confrontée à des différences de couverture, de système de coordonnées, de nombre d'attributs et de modalités, d'organisation ou d'échelle d'acquisition des données. L'intégration de bases de données ayant des schémas conceptuels différents introduit des difficultés d'appariement au niveau de la géométrie des objets et de leurs attributs. Des recherches sont en cours pour tenter de remédier aux difficultés d'appariement entre bases de données géographiques comme la BD Topo® et la BD Carto®⁷². Dans notre cas, la structuration des données dans le SIG et la volonté d'améliorer la qualité de nos données ont nécessité le recours à divers traitements, que nous allons décrire à présent.

2.5.6.1 Différence de couverture des données

Les données fournies par l'une des collectivités partenaires de cette étude, la Ville de Mulhouse, proviennent de sources différentes, à savoir la BD Topo® de l'IGN et le cadastre de la commune de Mulhouse. Elles couvrent des zones de taille différente. En effet, le cadastre couvre uniquement le ban communal de Mulhouse, alors que la BD Topo® englobe l'ensemble des communes étudiées. Cela implique que certaines données, notamment attributaires, issues du cadastre ne concernent pas l'ensemble de la zone étudiée.

A l'inverse, certaines données couvrent une surface plus grande que notre zone d'étude ; c'est le cas notamment des données de sismicité historique et instrumentale ou de la carte géologique référencée, qui couvre l'ensemble du sud du Fossé Rhénan Supérieur. Il faut alors alléger la couche pour ne conserver que les données concernant le périmètre de la zone d'étude.

2.5.6.2 Systèmes de coordonnées différents

Certaines données, comme les données sismiques, sont référencées dans le système de coordonnées géographiques (latitude, longitude), alors que les données de la Ville de Mulhouse et du Laboratoire Image et Ville sont en coordonnées projetées, Lambert II étendu ou Lambert II carto. Cela requiert de procéder à des changements de projections afin de pouvoir visualiser l'ensemble des couches sur un même plan.

2.5.6.3 Niveau de détail trop élevé

Le niveau de détail fourni par certaines tables attributaires est supérieur à nos besoins : en effet, il n'est pas nécessaire de savoir quelle personne a inventorié tel ou tel bâti, de disposer dans la table des données propres aux services du cadastre (code interne...), etc. Pour cela, un tri dans les attributs et les couches est indispensable.

⁷²On peut citer notamment les travaux du laboratoire COGIT sur cette thématique, et plus particulièrement les thèses de D. Sheeren [Sheeren, 2005] et N. Gesbert [Gesbert, 2005], les recherches de S. Mustière, C. Duchêne, E. Grosso et G. Touya sur l'intégration de la BD Topo® et de la BD Carto® par appariement et généralisation.

2.5.6.4 Différence d'organisation des données

Les données de bâti ne sont pas organisées de la même façon suivant leur provenance. La BD Topo® se présente sous la forme de plusieurs couches avec des bâtiments propres à chaque couche suivant leur nature ou leur fonction (industrie, bâtiment quelconque, court de tennis, stade, salle de sports... ; fig. 2.27). La table attributaire dont nous disposons⁷³ pour certaines de ces couches est très peu enrichie.

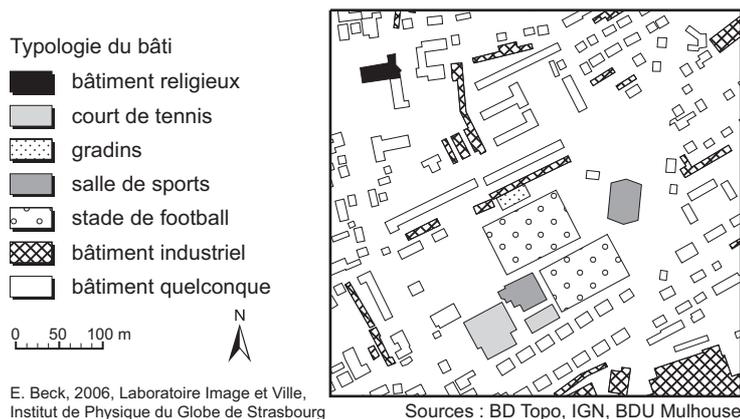


FIG. 2.27 – Données de bâti représentées par plusieurs couches superposées, dans la BD Topo® (un symbole correspond à une couche). La multiplicité des couches rend la structuration des données dans le SIG et sa manipulation plus lourdes.

A l'inverse, les données de bâti issues du cadastre se présentent sous la forme d'une seule couche et d'une table attributaire bien renseignée. Afin de diminuer le nombre de couches à afficher simultanément et de faciliter ainsi la lecture et le maniement de l'outil SIG, nous avons procédé à un regroupement des différentes couches de la BD Topo® pour obtenir au final une couche de bâtiments (fig. 2.28) et une couche de surfaces non construites.

2.5.6.5 Différences d'échelles d'acquisition et de richesse attributaire

La BD Topo® est construite au 1/10 000 alors que les données du cadastre sont au 1/200, ce qui implique de grandes différences de détails dans le figuré du bâti. Le ban communal de Mulhouse est couvert par les données provenant de ces deux sources. Il est préférable de faire des analyses de données via le SIG sur l'ensemble de la zone et d'avoir une seule couche de bâti pour l'ensemble de cette zone. C'est pourquoi les données graphiques de la couche de bâti du cadastre sont abandonnées, mais certains des attributs du cadastre sont associés à la couche du bâti de la BD Topo® car celle-là est plus enrichie du point de vue attributaire : nous avons identifié dans la couche de cadastre les attributs de certains bâtiments pour les intégrer dans la couche de bâti de la BD Topo®. Cette opération a été réalisée manuellement, étant donné les différences d'échelles d'acquisition et de précision qui rendent une automatisation difficile. La perte de détails dans la représentation graphique des bâtiments est compensée par un enrichissement des tables attributaires. Ce choix est

⁷³Les données de BD Topo® que la Ville de Mulhouse a mises à notre disposition ont fait l'objet de modifications propres au service "Topographie - Banque de données urbaine". Les tables attributaires ne sont plus sous leur forme d'origine.

justifié par l'échelle de notre étude, à savoir l'agglomération, qui n'est pas nécessairement compatible avec un niveau de détails aussi élevé que le propose le cadastre. Par ailleurs, la hauteur de bâtiment ne fait pas partie des attributs de la couche de bâti du cadastre, or il s'agit d'une information primordiale pour notre étude : ce point justifie davantage l'abandon de la couche de bâti du cadastre.

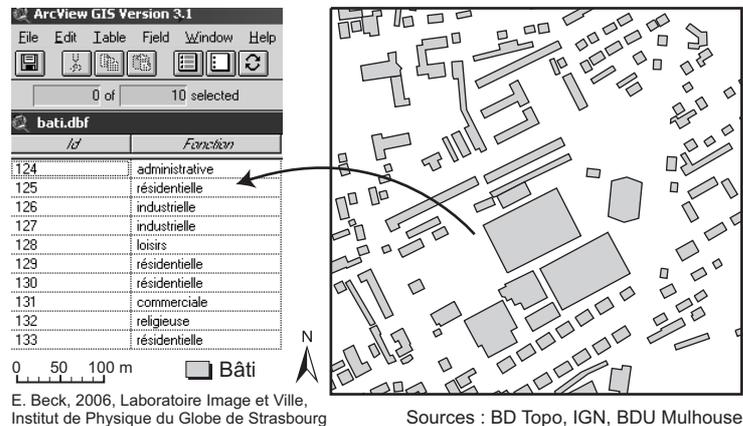


FIG. 2.28 – Couche de bâti après regroupement de plusieurs couches de la BD Topo® et table d'attributs associée. Le regroupement des couches permet d'aboutir à une structure du SIG plus simple et à un enrichissement de la table attributaire.

2.6 Le SIG multi-risques

Les données disponibles, collectées et créées ont fait l'objet d'un certain nombre de traitements, dans l'objectif d'améliorer leur qualité et d'optimiser leur structuration dans le SIG. Après avoir rappelé la diversité des études de risques par le biais des SIG et avoir souligné les avantages de cet outil, nous décrivons la structuration du SIG multi-risques telle que nous l'avons adoptée. Un quatrième paragraphe présentera le SIG en tant qu'outil d'aide à la décision pour la gestion des risques [Beck *et al.*, 2006b].

2.6.1 SIG et risques majeurs

L'utilisation des systèmes d'information géographique pour l'étude des risques majeurs remonte à une trentaine d'années [Glatron et Frasca, 1999]. Aujourd'hui, de nombreux chercheurs, organismes, administration, entreprises... s'en servent pour optimiser leurs études, évaluation, représentation voire gestion des risques majeurs. En effet, les fonctionnalités d'un SIG sont nombreuses et peuvent être aisément appliquées à la thématique des risques. Th. Joliveau a identifié trois principaux types d'usage du SIG : inventaire/observatoire, analyse/étude, gestion/suivi [Joliveau, 2004]. Ces usages s'appliquent à la problématique des risques, puisque les SIG contribuent à leur inventaire, à leur connaissance, leur représentation ou à leur gestion.

Si l'on considère que la gestion des risques s'organise en trois phases autour de la chronologie d'une catastrophe (prévention, gestion de crise, remédiation ; cf. § 2.6.4), le SIG devient un outil performant au cours de chacune de ces trois phases :

- **prévention** : le SIG intervient dans la représentation des aléas, la caractérisation de la vulnérabilité, l'inventaire des risques, leur spatialisation, la surveillance des phénomènes, etc. Parmi les nombreux exemples qui illustrent l'application des SIG à cette étape de gestion du risque, on peut citer les travaux de M. Vincent sur la cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles [Vincent, 2005]. Les SIG s'avèrent également performants dans la modélisation des phénomènes, comme c'est le cas des mouvements de terrain [Thiery *et al.*, 2005] ou les géosciences de manière générale [Bonham-Carter, 1994]. La surveillance d'un phénomène peut être effectuée par l'intermédiaire de SIG, c'est notamment le cas pour les feux de forêt ⁷⁴. Les SIG s'avèrent particulièrement performants lorsqu'ils sont couplés à des outils de simulation : c'est ce qui fait l'originalité des travaux développés par D. Alexandrian et P. Tran pour la cartographie dynamique des feux de forêt [Alexandrian et Tran, 2005]. De nombreuses administrations s'appuient sur les capacités des SIG en tant qu'outil d'aide à la décision : la communauté urbaine de Lille est l'un des exemples les plus anciens, puisque son premier SIG, tel qu'il a été identifié par S. Glatron et R. Frasca, date de 1976 [Glatron et Frasca, 1999]. Depuis, le nombre d'administrations dotées d'un SIG est en constante progression. Enfin, la communication de l'information sur les risques est facilitée par la mise en place de web-SIG : on peut citer par exemple celui du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, destiné à différents services décentralisés de l'État (DDE, préfetures, DIREN) [Appleton *et al.*, 2005] ou le prototype développé par C. Nakabasami [Nakabasami *et al.*, 2006] ;
- **gestion de crise** : le SIG est utilisé pour la localisation du phénomène catastrophique, l'aide à la décision dans les procédures d'urgence et d'intervention... Les services de secours peuvent avoir recours aux SIG pour optimiser leurs interventions, que ce soit au niveau de la gestion des moyens mobilisés (à Lyon, les pompiers disposent d'un système permettant, entre autres, d'afficher les itinéraires des véhicules envoyés sur les lieux d'accidents ; Glatron et Frasca, 1999) ou de l'intervention sur un sinistre (C. Hiegel [Hiegel, 2003] a mis au point un système embarqué grâce auquel les pompiers peuvent avoir une connaissance préalable des éléments potentiellement touchés par le sinistre lorsqu'ils partent en intervention) ;
- **remédiation** : le SIG est intéressant pour l'identification et l'évaluation des dégâts... Le traitement et l'analyse de données multi-dates (y compris les images satellites) permettent de faire un état des lieux post-catastrophe [Henry, 2004]. Les SIG se développent également dans le secteur des assurances, à des fins opérationnelles pré- ou post-catastrophes [Corona, 2006].

Les disciplines et objets d'étude associés trouvant un intérêt dans les SIG sont également variés. A notre connaissance, il n'existe pas de risque majeur n'ayant pas fait l'objet d'une évaluation ou d'une cartographie par l'intermédiaire d'un SIG. En effet, les quelques exemples ci-dessous illustrent la diversité des risques étudiés à l'aide des SIG :

- risques **naturels** : risque volcanique [Pareschi *et al.*, 2000], risque mouvements de terrain [Van Westen, 2000], risque inondation [Gambolati *et al.*, 2002], risque avalanches [Borrel, 1994], risque sismique [Nath, 2005] ;

⁷⁴Par exemple, le système canadien "Fire M3" : système de surveillance, de cartographie et de modélisation des incendies de forêt. Source : Ressources Naturelles Canada, Service Canadien des Forêts, http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/fr/background/bi_FM3_Intro_f.php.

- risques **technologiques** mineurs [Hiegel, 2001] ou majeurs [Propeck-Zimmerann *et al.*, 2002], risque de transport de matières dangereuses [Glatron, 1997] ;
- risques **sanitaires** [Crowley et McLafferty, 2002].

2.6.2 Avantages du SIG pour l'étude des risques

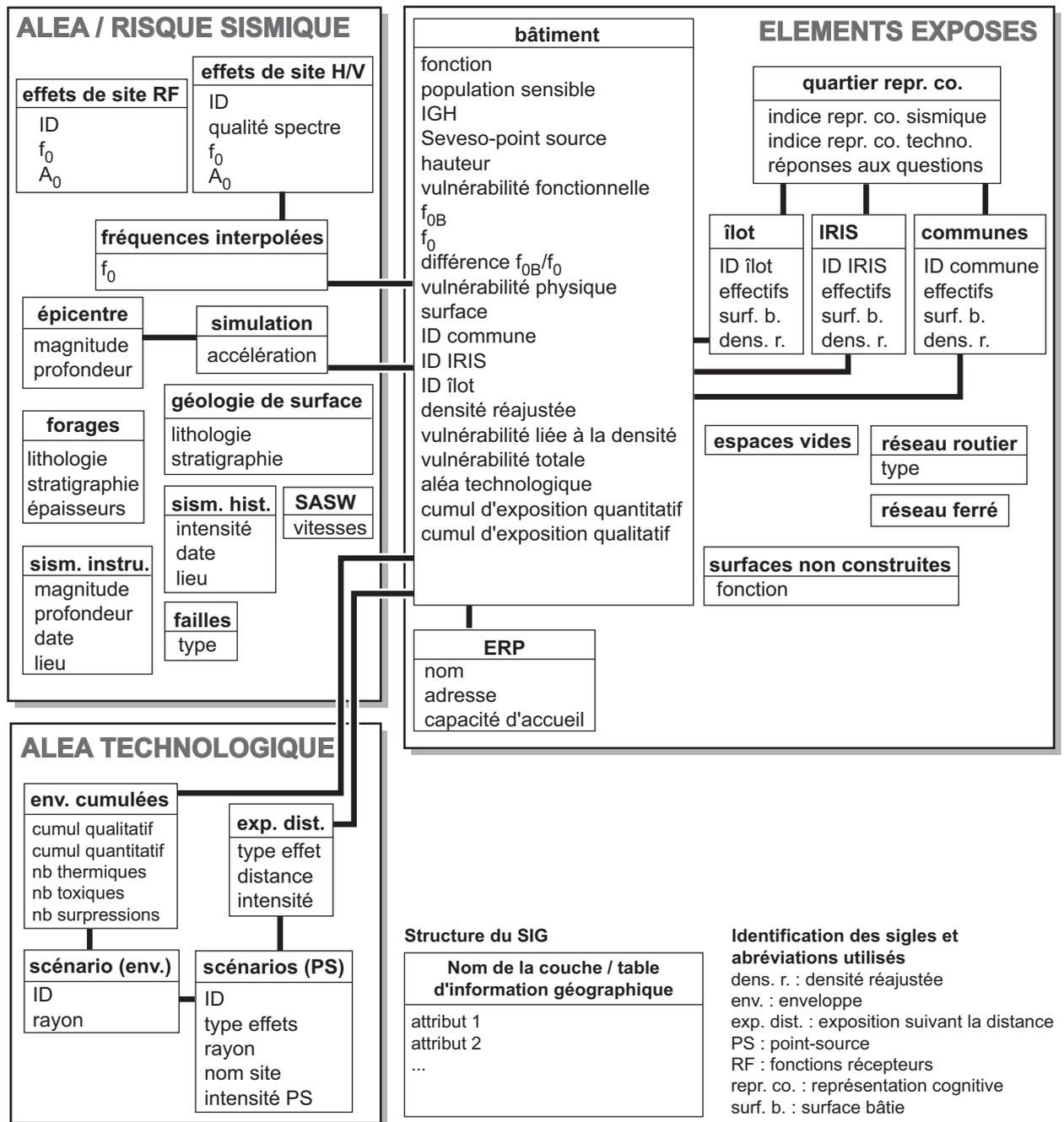
Le SIG constitue un outil présentant un certain nombre d'avantages quant à la problématique des risques. Parmi ces avantages, nous en avons sélectionné quelques-uns qui nous semblent particulièrement intéressants vis-à-vis de notre étude ; ils interviennent à trois niveaux :

- **la localisation et l'identification** : le SIG permet d'intégrer des données multi-sources, multi-échelles, de faire des traitements (analyse spatiale, traitements numériques, requêtes, sélections) entre elles. Parmi ces traitements, la combinaison des données d'aléa et de vulnérabilité constitue une des étapes les plus importantes puisqu'elle permet de formaliser le risque et de le cartographier. Les requêtes spatiales ou attributaires constituent un autre atout du SIG pour localiser parmi plusieurs milliers de bâtiments les instances dirigeantes, les bâtiments les plus sensibles ou identifier les bâtiments localisés à moins d'1 km d'une usine dangereuse... Bien que certains signes permettent d'identifier le risque dans le monde réel, grâce aux sources de danger (par exemple une industrie, un cours d'eau, ou les traces d'une catastrophe ; Glatron et Beck, 2005), il n'est véritablement concrétisé que par la catastrophe. Auparavant, il reste "potentiel" et invisible. Parmi les documents que l'on peut produire à l'aide du SIG, les cartes offrent la possibilité de le visualiser et de mieux se l'approprier ;
- **l'anticipation avec la simulation de phénomènes** : le SIG permet de faire diverses simulations, en modifiant certains paramètres. Par exemple, dans le cas de la simulation d'un séisme, on peut représenter plusieurs scénarios, en modifiant la magnitude et la localisation du séisme, la loi d'atténuation... et analyser les différences de résultats obtenus ;
- **le partage de la connaissance avec les acteurs** : la phase de présentation des résultats aux acteurs est facilitée par les atouts du SIG en termes de multi-représentations (choix des informations à représenter et symboles adaptés au public en fonction des objectifs), de gestion d'échelle (passage de l'échelle de la région à celle de l'agglomération puis celle du quartier).

2.6.3 Structuration des données dans le SIG

L'intégration dans un même système d'information géographique de données provenant de sources différentes nécessite une réflexion sur leur organisation.

Nous avons privilégié une organisation thématique des données, de manière à en faciliter la manipulation. Les catégories de données rejoignent la classification présentée précédemment par les tableaux 2.13 et 2.14, à savoir l'aléa et le risque sismique, l'aléa technologique, les éléments vulnérables et les données diverses.



E. Beck, 2006, Laboratoire Image et Ville, Institut de Physique du Globe de Strasbourg

FIG. 2.29 – Structuration des données dans le SIG. Le SIG comporte trois grands ensembles de données : celles relatives à l'aléa technologique, au risque sismique et aux éléments exposés. Un trait entre deux couches indique une liaison (jointure de table, jointure spatiale...).

Les interactions entre risques sont étudiées à l'échelle d'un ensemble de bâtiments mitoyens ; c'est pourquoi ce dernier constitue notre unité de base (unité la plus petite). L'ensemble des données est rapporté à cette unité, excepté la représentation cognitive des risques, cartographiée à l'échelle du quartier : à chaque ensemble de bâtiments sont associés, pour les attributs les plus importants (fig. 2.29), une fonction, une hauteur, une vulnérabilité fonctionnelle, une fréquence fondamentale de bâtiment, une fréquence fondamentale de site, une vulnérabilité physique, une surface bâtie, une densité de population "réajustée" (ramenée à la surface bâtie), une vulnérabilité liée à la densité de population, une vulnérabilité totale et un aléa technologique. La table attributaire de la couche de bâtiment est riche. La figure 2.29 illustre la structuration des données dans le SIG. Un trait entre deux couches indique une liaison (jointure de table, jointure spatiale) ou une opération entre elles (calcul de distance, interpolation...). Aux différentes données nécessaires à l'analyse des risques s'ajoutent un ensemble de données qui serviront à l'habillage des cartes ou à la localisation (forêts, réseau hydrographique, surfaces d'eau, altimétrie, orthophotos).

2.6.4 Le SIG multi-risques comme outil d'aide à la décision

La gestion des risques s'articule en trois phases distinctes (fig. 2.30), selon la chronologie d'une catastrophe (crise) :

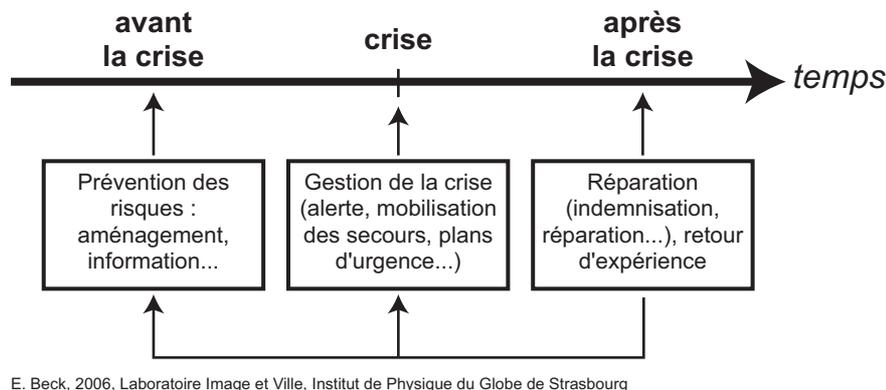


FIG. 2.30 – Les trois phases de la gestion des risques. Prévention, gestion de crise et phase de remédiation se succèdent chronologiquement (avant la crise, pendant la crise, après la crise).

- **avant la crise** : phase de prévention des risques, de mise en place des plans d'urgence, de l'information à la population, de la prévention par l'aménagement, des exercices grandeur nature... Jusqu'à présent, à notre connaissance, aucun exercice ne prend en compte les réactions en chaîne, car on en est encore à l'apprentissage de la gestion d'une seule crise à la fois. La phase de prévention correspond également à la phase d'évaluation des risques ;
- **pendant la crise** : l'efficacité des plans d'urgence est mise à l'épreuve, la gestion de crise s'organise (de l'alerte à la mobilisation et à l'intervention des secours, de l'information à la prise en charge des victimes...);
- **après la crise** : très rapidement après la catastrophe, les dommages sont évalués puis les réparations sont entreprises. L'efficacité des plans d'urgence est évaluée, ils sont réajustés par l'intermédiaire du retour d'expérience, qui agit sur la phase de prévention (connaissance du phénomène donc réajustements dans la connaissance du risque, prise

en compte dans l'aménagement en fonction de ces réajustements...) et sur la gestion de crise comme une boucle de rétroaction afin de minimiser les conséquences d'une potentielle autre catastrophe à venir.

La définition du SIG proposée par M. Didier et C. Bouveron [Didier et Bouveron, 1993] s'applique tout particulièrement à notre problématique : un SIG est "un ensemble de données repérées dans l'espace, structuré de façon à pouvoir en extraire commodément des synthèses utiles à la décision". Le SIG multi-risques intervient en tant qu'outil d'aide à la décision au cours de chacune des trois phases de la gestion des risques.

Avant la crise, les autorités ont la possibilité de localiser et identifier les secteurs cumulant effets de site et aléas technologiques ainsi que les bâtiments de vulnérabilité élevée par rapport à leur usage ou par rapport à la population qu'ils sont susceptibles d'accueillir : un hôpital, une école, un grand ensemble... n'ont pas la même vulnérabilité qu'une maison individuelle. Le fait de localiser ces bâtiments plus vulnérables peut guider les aménageurs dans leur tentative de limitation du risque par la réduction de la vulnérabilité : diminuer la vulnérabilité du bâtiment en le renforçant à l'aide de techniques de construction parasismique ou diminuer la vulnérabilité liée à l'usage de ce bâtiment (le type de population ou le nombre de personnes qui le fréquentent...). C'est notamment le cas si ces bâtiments de grande vulnérabilité sont localisés dans les secteurs cumulant effets de site et aléa technologique.

Le SIG peut également servir de support aux services de secours et aux autorités pour préparer la gestion d'une catastrophe, en prenant en compte les effets dominos potentiels : on ne se prépare pas à un séisme de la même manière qu'à une catastrophe industrielle. Et si les deux sont à craindre, il faut alors pouvoir mobiliser et orienter les moyens de réaction de façon ciblée par rapport aux conséquences du séisme et par rapport aux dommages causés par l'accident industriel consécutif au tremblement de terre. Le SIG permet alors de localiser les centres décisionnels, les lieux de vulnérabilité élevée, etc., par rapport aux secteurs cumulant effets de site et aléa technologique. Toujours dans l'objectif d'optimiser la gestion d'une crise, les scénarios établis à la suite de cette étude pourraient servir de base à la mise en place d'exercices grandeur nature prenant en compte les deux catastrophes.

Les enquêtes de perception ont pour objectif de mettre en avant les quartiers qui sous-estiment le plus les risques, qui ne connaissent pas ou mal les consignes de sécurité à suivre en cas de catastrophe, due à un tremblement de terre ou un accident industriel. Dès lors, les résultats fournis par cette enquête permettront aux autorités de mieux cibler spatialement leurs campagnes de prévention (puisque les résultats de l'enquête sont localisés et intégrés dans une couche du SIG) mais aussi dans le contenu et la forme de l'information à diffuser (ciblée sur les consignes de sécurité, sur la localisation des sources de danger et l'extension des effets redoutés...).

Enfin, pour les zones non bâties, un croisement (dans les SIG) de la couche d'aléa technologique et d'effets de site avec la couche du plan local d'urbanisme (PLU) pourra guider les urbanistes dans l'aménagement urbain futur. En effet, tout comme il existe un zonage spécifique au risque industriel (dans le cadre du plan d'occupation des sols - POS -, il s'agissait du zonage UX1s), on pourrait envisager un même zonage destiné à spécifier les zones caractérisées par des effets de site dans laquelle une réglementation particulière devrait être appliquée, ou dans laquelle tel ou tel usage du sol (industrie à risque, ERP) serait proscrit.

La loi d'orientation pour l'aménagement et le développement durable du territoire du 25 juin 1999 (appelée aussi Loi Voynet) oblige les acteurs à tenir compte des enjeux environnementaux et augmente leur besoins en outils méthodologiques. Par exemple, le Plan Environnement Collectivités et l'Analyse Environnementale de l'Urbanisme (développée dès 1996 par l'ADEME, l'agence de l'environnement et de maîtrise de l'énergie) constituent des études préalables aux choix d'aménagement et d'urbanisme. Leur objectif est d'intégrer les préoccupations environnementales en amont [Mancebo, 2003].

Pendant la crise, les services de secours peuvent interroger la base de données spatialisée et déterminer si des bâtiments sensibles en termes de fonction ou de population accueillie se trouvent dans la zone sinistrée et sont susceptibles d'avoir été touchés par la catastrophe, et il faut donc envoyer les secours d'urgence.

Après la crise, au cours de la phase de remédiation, si des données de valeur vénale sont intégrées dans la base de données spatialisées, le SIG peut être utilisé pour alimenter les évaluations des dommages en termes de coût.

En conclusion, le SIG multi-risques intervient majoritairement au cours de la phase de prévention des risques en tant qu'outil d'aide à la décision, surtout en tant que support dans la réflexion sur l'occupation et l'usage du sol.

2.7 Conclusion du deuxième chapitre

Une démarche d'étude des interactions entre risques sismique et technologiques a été présentée dans ce deuxième chapitre. Il en résulte quatre étapes, dont les trois premières portent sur les trois composantes de ces deux risques (aléa sismique, aléa technologique, éléments vulnérables) et la quatrième consiste à combiner l'ensemble des données en un scénario.

Concernant l'aléa sismique, la prise en compte des effets de site apparaît comme primordiale : ils ont été évalués à l'aide de deux méthodes complémentaires, celle de Nakamura (mesures de bruit sismique) et celle des fonctions récepteurs (enregistrement de séismes). Toutes deux sont des méthodes adaptées aux contextes géologique et tectonique de la région étudiée. L'intégration du facteur d'amplification dans la simulation des effets d'un tremblement de terre constitue une étape délicate, sur laquelle une réflexion approfondie doit être poursuivie.

L'aléa technologique n'a pas été évalué à proprement parler. Toutefois, nous avons tenté de caractériser l'exposition cumulée, qualitative et quantitative. Pour cela, nous avons superposé les surfaces correspondant à l'extension spatiale des effets d'un scénario d'accident (enveloppe) et pris en compte des gradients d'effets liés à la distance à la source de danger (point source).

Quant aux éléments exposés, nous nous sommes intéressée aux bâtiments et à la population. Chaque catégorie d'éléments vulnérables a été étudiée selon deux approches, l'une quantitative, l'autre qualitative.

D'une part, nous avons évalué la vulnérabilité physique d'un bâtiment à un séisme par l'intermédiaire de son potentiel à entrer en résonance. D'autre part, nous avons caractérisé la vulnérabilité fonctionnelle de la ville par une approche systémique, qui considère que

les conséquences de la destruction d'un bâtiment sur le fonctionnement d'une ville sont différentes suivant la fonction de ce bâtiment. Nous avons privilégié non pas les fonctions à valeur économique ou culturelle mais celles intervenant dans la gestion d'une crise (instances dirigeantes, hôpitaux, services de secours. . .) ou caractérisées par une vulnérabilité élevée et nécessitant une intervention rapide. En effet, les conséquences d'une catastrophe seront aggravées si les services impliqués dans la gestion de crise ne sont pas en mesure de jouer leur rôle.

La vulnérabilité de la population a également été abordée par deux approches complémentaires, l'une quantitative, mesurant la densité réelle de la population, l'autre qualitative, basée sur la construction de deux indices de vulnérabilité liés à la représentation cognitive des risques sismique et technologiques, cette dernière étant évaluée à partir des résultats d'enquête auprès de la population. Ce deuxième volet permettra par ailleurs de confronter le risque perçu avec le risque réel.

L'analyse des interactions entre risques passe d'abord par une analyse de chaque risque, en combinant les données d'aléa et de vulnérabilité. L'interaction intervient si des réactions en chaîne se produisent suite à la simulation d'un séisme. Il s'agit alors d'analyser d'une part les accélérations supportées par les bâtiments des usines Seveso où des accidents technologiques pourraient se produire, d'autre part leur potentiel à entrer en résonance.

L'ensemble des données collectées et intégrées dans le SIG sont hétérogènes en raison de la diversité de leurs sources, de leurs échelles d'acquisition, de leur richesse attributaire. Cette hétérogénéité est responsable d'une partie des incertitudes que l'on peut rencontrer. Nous avons cependant opéré divers traitements sur les données, dans l'objectif de diminuer les incertitudes et optimiser l'organisation des couches dans le SIG. La structuration des données dans le SIG montre bien que les bâtiments (ou plus précisément de l'ensemble de bâtiments mitoyens) sont en position centrale dans l'analyse : on les qualifie en termes de vulnérabilités fonctionnelle et physique, de densité de population, on s'y rapporte pour connaître les éventuelles interactions entre risques. . .

Il en ressort que la vulnérabilité physique du bâti constitue le point central dans l'interaction entre risques sismique et technologiques et qu'en l'absence de bâtiments vulnérables et susceptibles d'être atteints, des réactions en chaîne ne peuvent se produire.

Un certain nombre de choix ont dû être opérés de manière à adapter la méthodologie à l'échelle de l'étude (l'agglomération). Cette notion d'échelle prend ici tout son sens car les données, modèles, techniques utilisés ne sont pas les mêmes suivant que l'on décide de travailler à échelle micro (site technologique ou quartier) ou à échelle macro (agglomération) voire régionale. Des choix s'imposent lorsqu'on aborde la problématique des risques à l'échelle de l'agglomération, des simplifications sont également nécessaires, sans pour autant entrer dans une logique simplificatrice ou réductrice.

A présent, les résultats de l'application de cette méthode à l'agglomération de Mulhouse vont être présentés dans un troisième chapitre.

Chapitre 3

Connaître pour mieux gérer : application à l'agglomération de Mulhouse

La démarche d'étude des interactions entre risques sismique et technologiques a été présentée dans le chapitre précédent. A présent, nous allons l'appliquer à une zone d'étude, l'agglomération de Mulhouse (Haut-Rhin) pour, en quelque sorte, la valider et en soulever les points forts et faiblesses. Une première section présentera le contexte mulhousien (tectonique, géographique, historique - en insistant sur l'aspect industriel -, socio-démographique), alors qu'une seconde section s'attachera à la présentation et à l'analyse des résultats.

3.1 Mulhouse, agglomération multi-risques : présentation du contexte général

L'agglomération de Mulhouse, localisée dans le sud de l'Alsace et plus précisément dans le département du Haut-Rhin, ne semble pas *a priori* particulièrement menacée par des aléas naturels ou même anthropiques. Et pourtant, elle accumule sept sources de danger de nature différente, naturelle ou anthropique, qui affectent les communes concernées de manière différente. Ces aléas sont, d'une part, inhérents au contexte naturel dans lequel la ville de Mulhouse et les villages avoisinants se sont installés et, d'autre part, liés au développement industriel de la ville.

La carte 3.1 présente les différentes communes concernées de manière totale ou partielle par l'étude (enquêtes, mesures de bruit sismique) : Baldersheim, Bruebach, Brunstatt, Didenheim, Habsheim, Illzach, Kingersheim, Lutterbach, Morschwiller-le-Bas, Mulhouse, Pfastatt, Richwiller Riedisheim, Rixheim, Sausheim, Wittenheim et Zimmersheim. Seule la commune de Thann, sur le territoire de laquelle a été installée une station sismique temporaire et qui est localisée à une quinzaine de kilomètres à l'ouest-nord-ouest de la zone d'étude, n'apparaît pas. La carte 3.2 présente le contexte topographique et hydrographique de l'étude, qui sera décrit dans les paragraphes suivants.

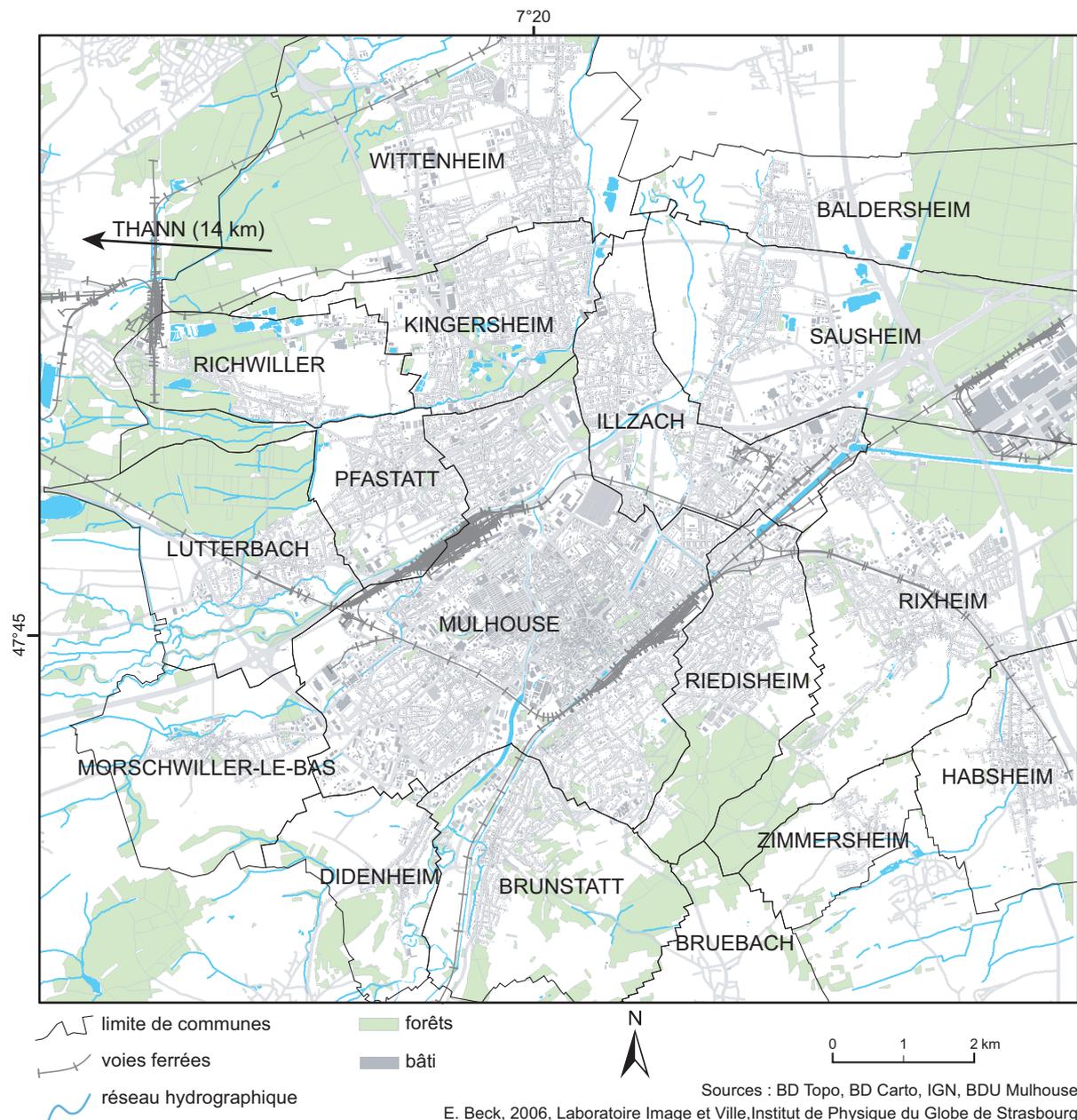


FIG. 3.1 – Communes concernées par cette étude. La zone d'étude est centrée autour de la ville de Mulhouse. Les communes concernées sont : Baldersheim, Bruebach, Brunstatt, Didenheim, Habsheim, Illzach, Kingersheim, Lutterbach, Morschwiller-le-Bas, Mulhouse, Pfastatt, Richwiller Riedisheim, Rixheim, Sausheim, Wittenheim et Zimmersheim. Seule la commune de Thann, sur le territoire de laquelle a été installée une station sismique temporaire et qui est localisée à une quinzaine de kilomètres à l'WNW de la zone d'étude, n'apparaît pas.

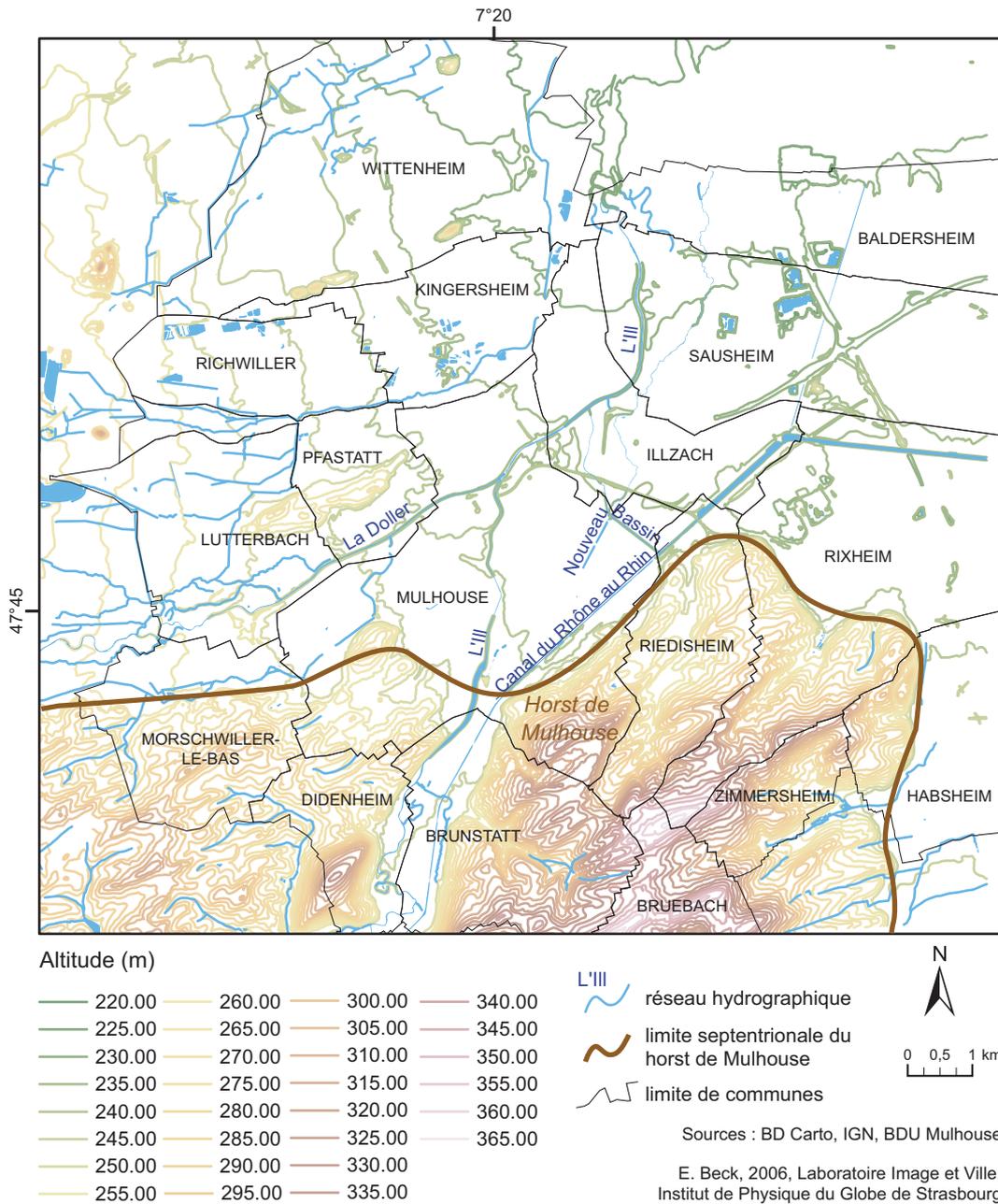


FIG. 3.2 – Contexte naturel : topographie et hydrographie de la zone d'étude. Le réseau hydrographique est dominé par l'Ill et la Doller ; la topographie est plane au nord et marquée par le horst de Mulhouse au sud.

3.1.1 Un contexte tectonique favorable à l'occurrence de séismes, des conditions géologiques susceptibles d'en aggraver les effets

Tout d'abord, il convient de présenter le contexte tectonique et géologique dans lequel l'agglomération prend place, le Fossé Rhénan.

Pour mieux comprendre le contexte tectonique local, il est nécessaire de se situer à l'échelle de l'Europe Centrale (fig. 3.3). La sismicité du Fossé Rhénan s'explique notamment dans le contexte de la Tectonique des Plaques avec la remontée vers le nord de la plaque africaine, qui entre en collision avec la plaque eurasienne. Cette remontée progressive, également à l'origine de la surrection des Alpes et du Jura, génère une accumulation de contraintes le long de certaines failles jusque dans le Fossé Rhénan, contraintes qui sont alors à l'origine des séismes lorsqu'elles sont libérées. Il existe aussi une sismicité liée au rejeu des failles directes rhénanes et hercyniennes.

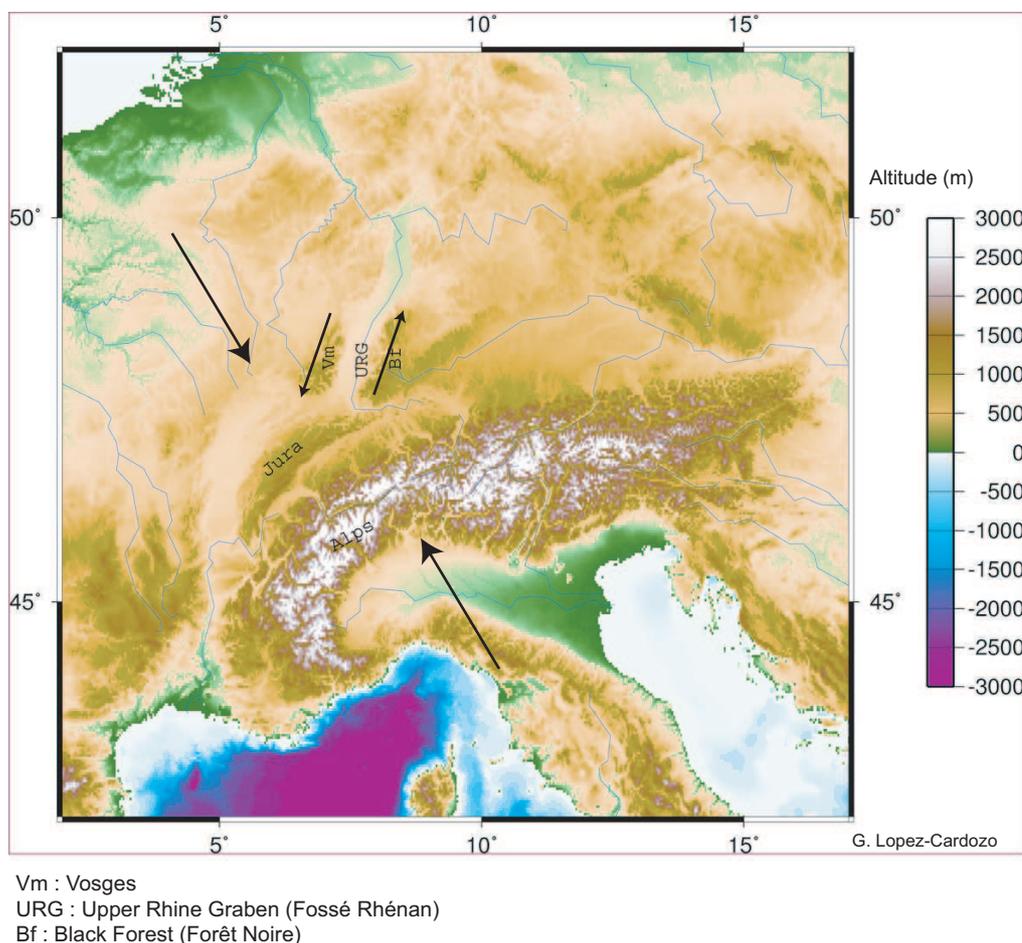


FIG. 3.3 – Contexte tectonique de l'Europe Centrale (G. Lopez-Cardozo). Les flèches opposées et orientées vers le massif alpin illustrent la direction de contrainte maximale ; ce mouvement de compression NW-SE génère un mouvement dextre sur les failles bordières rhénanes (flèches parallèles en bordure du Fossé Rhénan).

Le Fossé Rhénan est un fossé d'effondrement formé en deux phases [Villemin et Coletta, 1990], la première de l'Eocène au début de l'Oligocène (39-36 Ma) et la seconde de l'Oligocène au Miocène (25-20 Ma). Le Fossé Rhénan est bordé par deux massifs cristallins,

les Vosges à l'ouest et la Forêt-Noire à l'est (fig. 3.4). Entre ces deux formations montagneuses s'étend une vaste plaine alluviale ainsi que des massifs de collines, formés de terrains secondaires et fortement faillés.

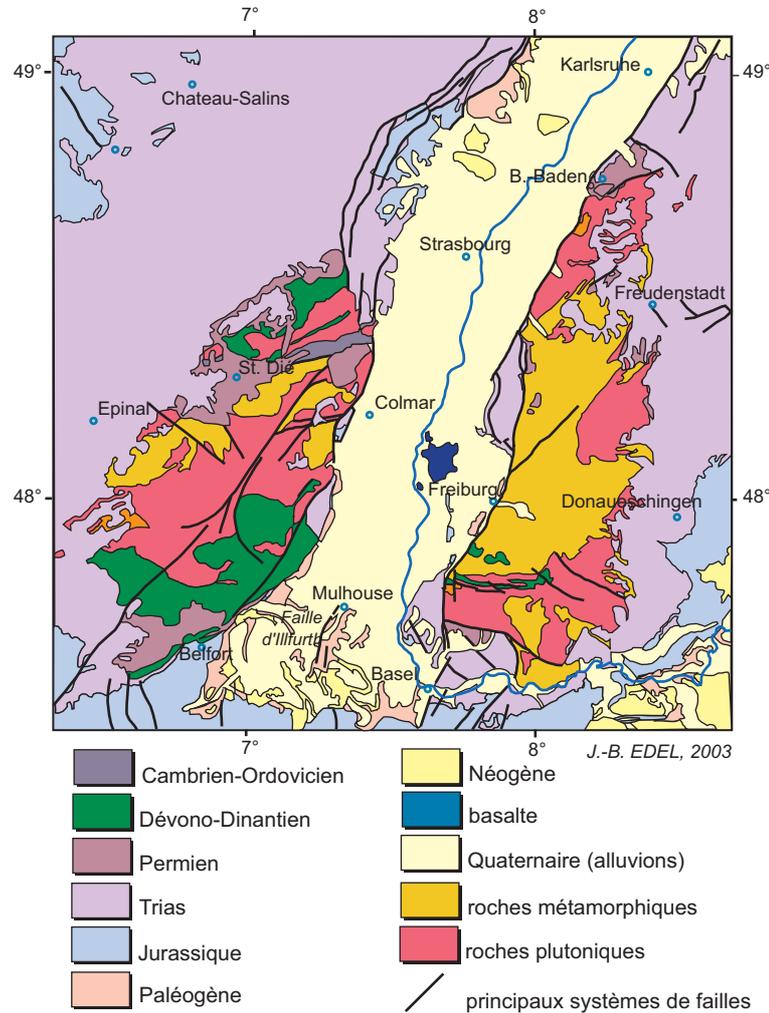


FIG. 3.4 – Carte géologique des Vosges, du Fossé Rhénan et de la Forêt-Noire (J.-B. Edel, 2003). Les deux massifs cristallins (Vosges et Forêt-Noire) sont séparés par le Fossé Rhénan, un fossé d'effondrement comblé d'alluvions rhénanes et vosgiennes.

Sur le plan géologique, Mulhouse est localisée dans une plaine alluviale, ce qui pourrait aggraver les effets d'un séisme, compte tenu de possibles effets de site plus généralement observés sur des sols peu consolidés. Le sud de la région correspond au début du Sundgau, interprété comme le horst de Mulhouse (fig. 3.2). La majeure partie de la région étudiée est caractérisée par des alluvions quaternaires déposées par le Rhin et les cours d'eau vosgiens (fig. 3.5). Leur épaisseur atteint localement 240 m, 90 m pour les formations les plus récentes. Les formations plus anciennes (tertiaires) affleurent localement sur le horst de Mulhouse (calcaires, marnes, molasse de l'Oligocène) mais sont généralement recouvertes d'une épaisse couche de loess (jusqu'à 20 m d'épaisseur). La structure faillée du horst de Mulhouse est connue à la suite de travaux de Förster, Werveke et Théobald (1952). Il s'agit essentiellement d'un réseau de failles normales formant un système où dominent les directions SW-NE recoupées par des failles sensiblement orthogonales" [Théobald et Schweitzer, 1976, p. 18].

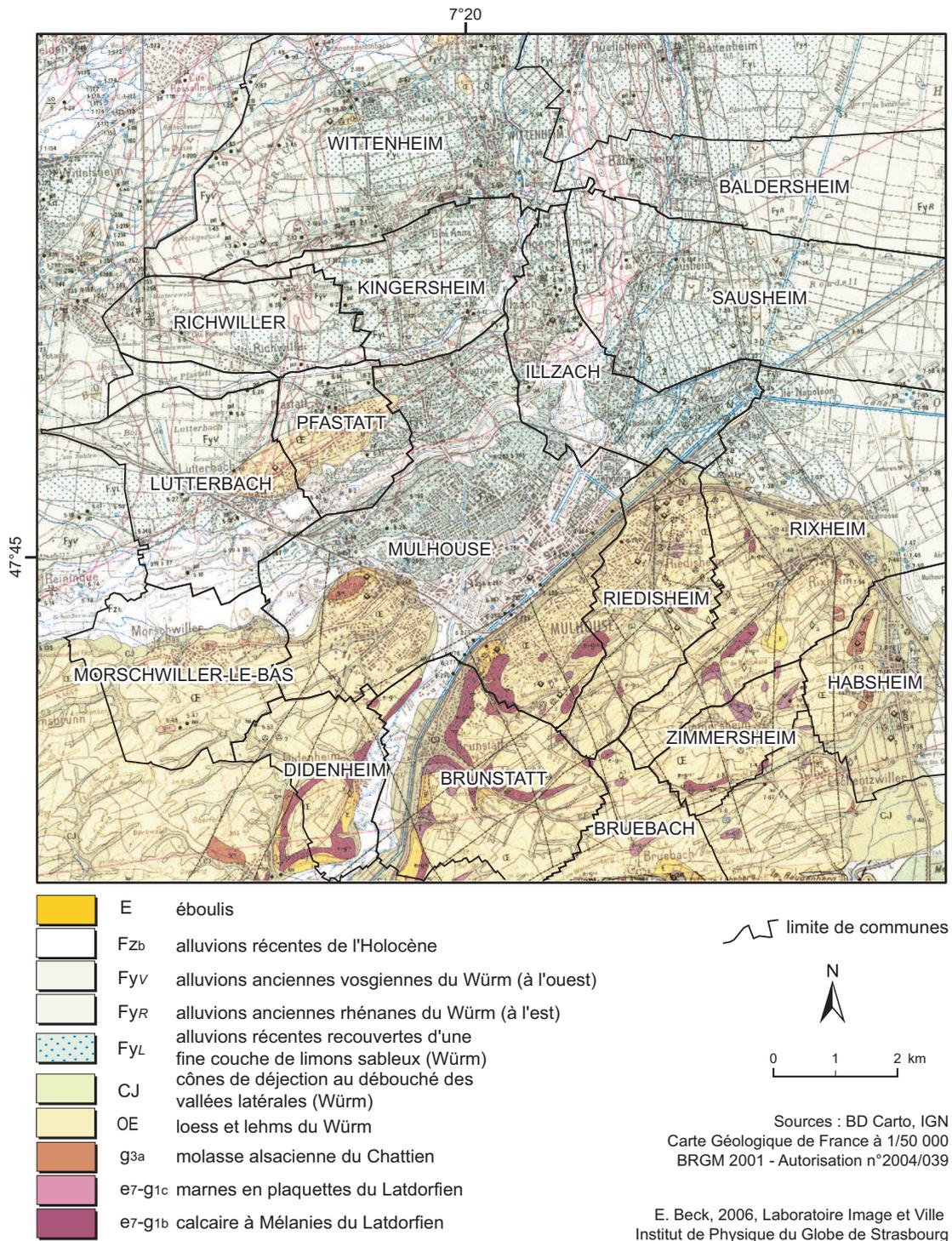


FIG. 3.5 – Carte géologique de l'agglomération de Mulhouse. La majeure partie de la région est caractérisée par des alluvions quaternaires. Au sud, le horst du Mulhouse est constitué de formations tertiaires qui affleurent très localement mais sont majoritairement couvertes par des lœss datant du Würm.

Le horst est une structure faillée (failles normales de direction principale SW-NE, avec des failles quasiment orthogonales ; fig. 3.5), dont l'extrémité nord-ouest correspond à la faille dite "de la gare de Mulhouse" [Nivière et Winter, 2000].

Avec une topographie plus marquée, le horst est en opposition avec le reste de la zone d'étude (altitude maximale de 365 m contre des altitudes moyennes de 240 m ; fig. 3.2). Dans le nord, la topographie est relativement plane (260 à 230 m d'altitude d'ouest en est, avec une pente inférieure à 0.3 %). Le réseau hydrographique est dominé par l'Ill et la Doller, qui s'écoulent selon une direction SSW-NNE pour l'Ill au sud de Mulhouse et WSW-ENE pour la Doller. Cette dernière se jette dans l'Ill à l'est de Pfastatt, à proximité de la gare de triage. La rivière résultante (l'Ill) s'écoule vers le nord à partir d'Illzach (fig. 3.2). A l'amont, l'Ill est entièrement canalisée dans la ville de Mulhouse. Elle est cependant plus sinueuse sur le territoire de Didenheim. Le réseau hydrographique artificiel est assez développé, comme en témoignent le canal du Rhône au Rhin et le Nouveau Bassin, dans la partie est de Mulhouse. La Doller est également caractérisée par un chenal sinueux, anastomosé dans certains secteurs, mais canalisé lorsqu'elle passe à proximité de l'autoroute A36, au sud de Lutterbach.

En définitive, le contexte tectonique et géologique du Fossé Rhénan constitue un élément favorable à l'occurrence de séismes et à l'observation d'effets de site. Cependant, les tremblements de terre ne sont pas le seul danger potentiel auquel la région doit faire face.

3.1.2 Aléas naturels et sismicité de la zone d'étude

Trois aléas naturels constituent des menaces réelles pour l'agglomération : les inondations, les coulées boueuses et les séismes. Nous ne prenons en compte dans cette étude que le cas du séisme car il concerne l'ensemble des communes : les ouvrages de protection et l'absence d'arrêté de catastrophe naturelle suggèrent que les aménageurs considèrent les inondations comme maîtrisées dans la ville de Mulhouse, même si ce n'est pas le cas pour d'autres communes comme Brunstatt ou Didenheim, localisées au sud de l'agglomération (fig. 3.1). Les inondations, par débordement ou par remontée de nappe, affectent régulièrement les communes de la région, comme en témoignent les arrêtés de catastrophe naturelle (Brunstatt : 1983, 1987, 1989, 1995, 1999, 2002 ; Didenheim : 1983, 1999, 2002 ; Kingersheim : 1983 (deux événements), 1999, 2000...¹). Ce sont principalement les orages de printemps et d'été qui sont à l'origine des coulées boueuses, favorisées par la culture intensive du maïs sur les collines du Sundgau et par les terrains relativement meubles (plaquages de loess).

Le contexte tectonique du Fossé Rhénan et de ses bordures (Vosges, Jura, Forêt-Noire) est à l'origine d'une sismicité actuelle faible à moyenne (zone Ib² voire II³ du zonage sismique français selon le décret n°91-461 du 14 mai 1991 relatif à la prévention du risque sismique et basé sur les cantons), comme en témoignent les séismes de Sierentz (30 juillet 1980, $M_L = 4.8$), Rambervillers (22 février 2003 ; $M_L = 5.4$), Roulans (23 février 2004 ; $M_L = 5.1$) et Waldkirch (Allemagne ; 5 décembre 2004 ; $M_L = 5.3$)⁴. Cependant, des séismes de magnitude plus élevée, comme ce fut le cas lors de la crise de Bâle de 1356-1357, peuvent se produire. Il y a bientôt 650 ans, le 18 octobre 1356, la ville de Bâle et la région alentour ont été fortement endommagées par un séisme d'une intensité macrosismique $I_o = IX-X$ [Meghraoui *et al.*, 2001]. Ce tremblement de terre est considéré comme un des

¹Source : www.prim.net, consulté début 2006

²Cantons d'Illzach (communes de Baldersheim, Illzach et Sausheim), Mulhouse-Est, Mulhouse-Nord, Mulhouse-Ouest et Mulhouse-Sud (communes de Bruebach, Brunstatt, Didenheim, Mulhouse et Morschwiller-le-Bas) et Wittenheim (communes de Kingersheim, Lutterbach, Pfastatt, Richwiller et Wittenheim).

³Canton de Habsheim (communes de Habsheim, Riedisheim, Rixheim et Zimmersheim).

⁴Données : RéNaSS.

séismes les plus importants ayant affecté l'Europe de l'Ouest au cours du dernier millénaire. Quatre-vingts châteaux forts construits dans un rayon de 40 km autour de la ville de Bâle ont été plus ou moins fortement endommagés, ce qui indique la violence de l'événement (fig. 3.6). Un séisme d'une même ampleur conduirait aujourd'hui à des dommages dont le coût est estimé entre dix et trente milliards d'euros [Fäh et Deichmann, 2001].



FIG. 3.6 – Représentation du séisme de Bâle (18 octobre 1356, $I_o = IX-X$) par C. Wurtisen, 1580. L'impact du séisme a été catastrophique, dans le contexte du XIV^e siècle.

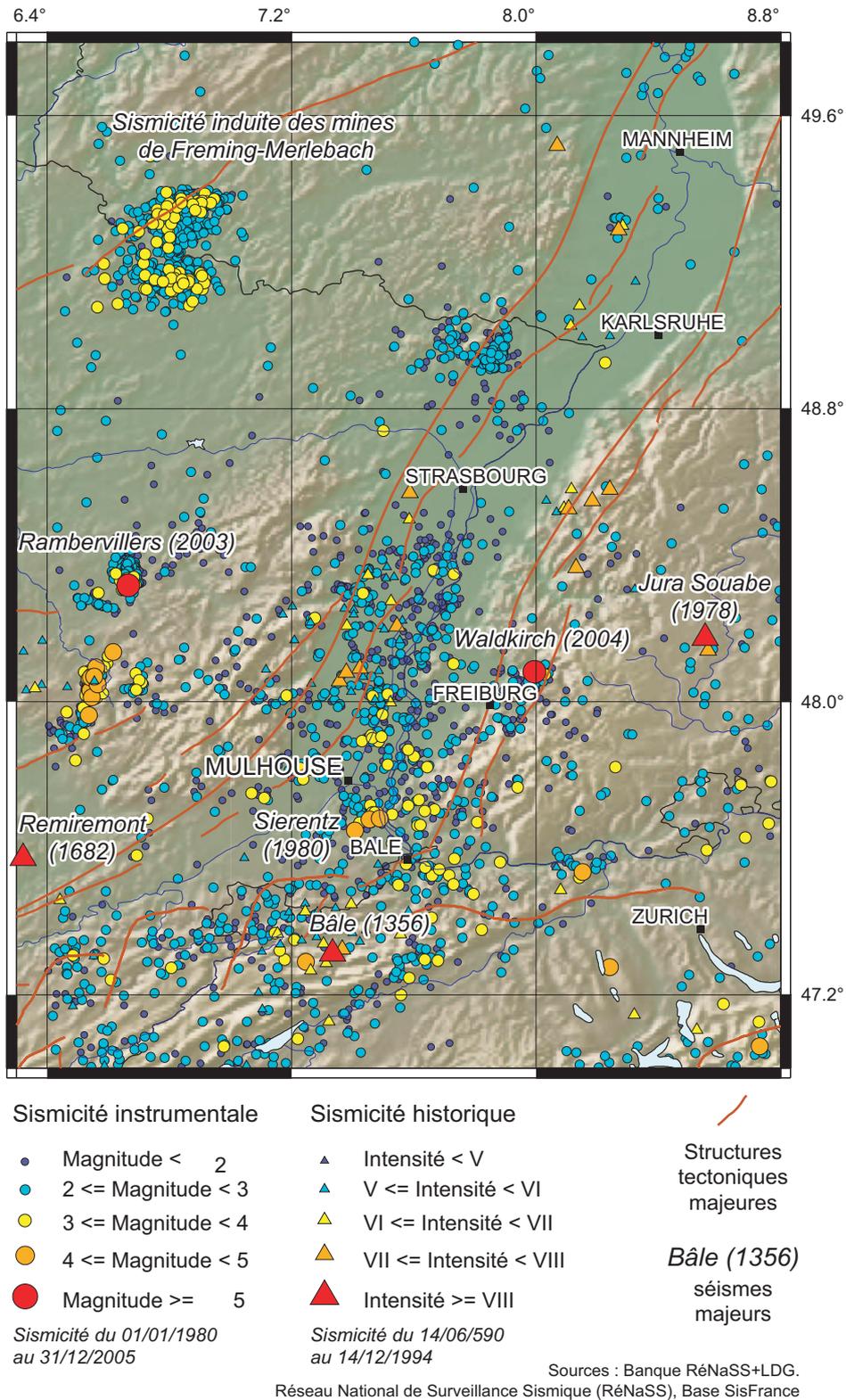
La sismicité instrumentale du Fossé Rhénan est caractérisée par une dissymétrie est-ouest et une distribution déséquilibrée entre le nord et le sud : davantage de séismes se sont produits dans la partie sud du Fossé Rhénan, plus particulièrement dans l'est du Fossé Rhénan Supérieur (fig. 3.7).

3.1.3 Les origines et l'histoire industrielle de Mulhouse, genèse des risques contemporains technologiques

Pour mieux appréhender les risques industriels auxquels l'agglomération de Mulhouse est actuellement exposée, il convient de rappeler l'évolution de la ville de Mulhouse.

Elle s'est développée autour de la rivière Ill et, très vite, cette contrainte naturelle s'est transformée en atout puisque les premiers habitants de ce qui deviendra plus tard Mulhouse, citée sous le nom de Mulinhuson en 803 [Livet et Oberlé (dir.), 1977], ont su tirer profit de l'Ill par le biais de la force hydraulique en y construisant un moulin. La ville de Mulhouse s'est véritablement développée autour de l'industrie, avec une apogée au XIX^e siècle grâce à l'industrie textile et minière qui s'est développée, pour cette dernière, en raison de la proximité du bassin potassique. Ce développement économique a favorisé l'explosion démographique : 6 000 habitants en 1798, 60 000 en 1866 ⁵, 107 000 en 1910 [Frémont, 2001], en partie grâce à l'arrivée de populations suisses et allemandes. Cet essor ne parvient pas à se poursuivre au XX^e siècle et la population décroît jusqu'en 1954 (97 000 habitants). Plus qu'une crise industrielle, la ville de Mulhouse a subi une mutation de ses activités, avec une décroissance de l'activité textile qui a fait place aux industries chimiques et mécaniques (notamment automobile), de production d'appareillage électrique et de matières plastiques sur lesquelles la vie économique de la fin du XX^e siècle et du XXI^e

⁵Source : site internet de l'Office du Tourisme de Mulhouse <http://www.ot.ville-mulhouse.fr/index.php>. Consulté début 2006.



E. Beck, 2006, Laboratoire Image et Ville, Institut de Physique du Globe de Strasbourg

FIG. 3.7 – Sismicité historique et instrumentale du Fossé Rhénan. La sismicité historique est caractérisée par trois événements majeurs (séismes de Bâle, en 1356, de Remiremont, en 1682, et du Jura Souabe, en 1978) et la sismicité instrumentale par les séismes de Sierentz, Rambervillers et Waldkirch.

siècle repose. L'apparition de l'industrie chimique dans la ville est directement liée à celle du textile, puisque, très vite, le besoin de produire des substances permettant de colorer ou de blanchir les tissus, et notamment les fameuses indiennes (fig. 3.8), s'est fait ressentir. L'industrie chimique s'est ensuite diversifiée pour se tourner davantage vers la synthèse de produits intermédiaires destinés aux secteurs de l'industrie chimique, du textile, du bâtiment, de l'automobile (entreprise Nufarm, dont le site mulhousien a fermé ses portes en décembre 2003) et vers la chimie organique (entreprise Rhodia Mulhouse-Dornach, implantée depuis 1892).



FIG. 3.8 – *Fabrique d'indiennes et filature de M. Schlumberger Grosjean et C°, à Mulhouse (source : Mieg, 1982). L'apparition de l'industrie chimique dans la ville de Mulhouse est directement liée à celle du textile, puisque, très vite, le besoin de produire des substances permettant de colorer ou de blanchir les tissus, et notamment les fameuses indiennes, s'est fait ressentir.*

3.1.4 Des menaces d'origine anthropique localisées dans l'agglomération, d'autres plus excentrées

L'activité industrielle de la ville de Mulhouse explique la présence de nombreuses usines et notamment des usines dangereuses. Trois installations classées "Seveso seuil haut", donc faisant l'objet d'un PPI, sont localisées dans l'agglomération (fig. 3.9).

La première, l'usine Rhodia Mulhouse-Dornach, est localisée dans le secteur ouest de Mulhouse et est concernée par les risques toxique (ammoniac, fumées toxiques en cas d'incendie), d'incendie et d'explosion (butadiène, cyclohexane, hydrogène, poudres organiques). La deuxième, l'entreprise TYM (Illzach), est spécialisée dans le transport de produits chimiques. Les risques technologiques de l'agglomération mulhousienne ne sont pas uniquement de nature industrielle et chimique, puisqu'un entrepôt de produits pétroliers constitue le troisième site classé Seveso "seuil haut" (entrepôts pétroliers de Mulhouse, EPM) ; il est implanté sur la commune d'Illzach.

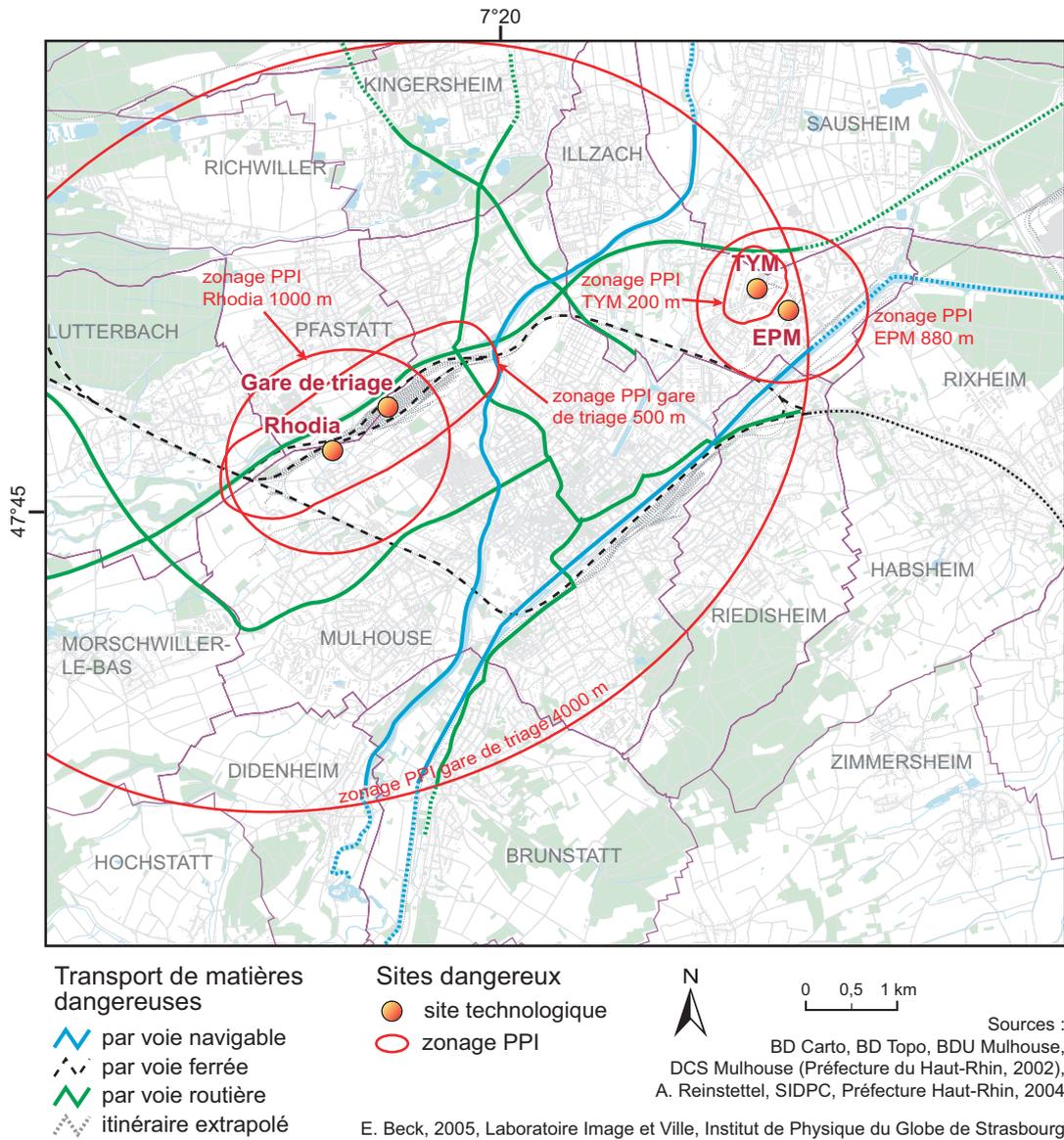


FIG. 3.9 – Sites technologiques dangereux et axes de transport de matières dangereuses (TMD) dans l'agglomération mulhousienne. L'aléa technologique de l'agglomération mulhousienne est caractérisé par trois installations classées "Seveso seuil haut" (Rhodia, TYM et EPM), une gare de triage où sont stockées et par où transitent des matières dangereuses et de nombreux axes de TMD routier, ferré et fluvial (plus de 40 km pour la ville de Mulhouse).

Un quatrième site, la gare de triage (dite “gare du Nord”), constitue un cas à part : elle n’est pas considérée comme un établissement classé mais les matières stockées et en transit génèrent des risques toxique et d’incendie ; aussi, des périmètres PPI ont été définis ⁶, l’un d’un rayon de 500 m, l’autre d’un rayon de 4 000 m autour de l’emprise de la gare ⁷ (fig. 3.9). Ce dernier recouvre au moins partiellement quinze communes et la quasi-totalité du territoire communal de Mulhouse, Pfastatt, Kingersheim, Lutterbach et Morschwiller-le-Bas.

L’implantation de ces entreprises explique le développement du TMD par les voies routières, ferrées et fluviales (fig. 3.9 ⁸). Ainsi, plus de 40 km d’axes de transport sont concernés par cette menace uniquement sur le territoire communal de Mulhouse [MATE *et al.*, 2002]. Enfin, plusieurs communes de l’agglomération sont menacées par la proximité du barrage de Michelbach, localisé à 23 km à l’ouest de Mulhouse. Elles pourraient être affectées par des inondations consécutives à la rupture de la digue [MATE *et al.*, 2002]. La proximité de la centrale nucléaire de Fessenheim, localisée à 30 km au nord-est la zone d’étude, représente le dernier danger d’origine anthropique auquel l’agglomération mulhousienne est exposée.

3.1.5 Une agglomération vulnérable

Si l’agglomération est exposée à sept aléas différents, le risque est d’autant plus élevé que la zone d’étude est vulnérable en raison d’une importante population (plus de 200 000 habitants), de son activité économique, de ses nombreux axes de communication, mais également de son contexte géologique, tectonique et géographique. Ces caractéristiques, considérées de prime abord comme des atouts, deviennent alors des faiblesses car elles constituent des éléments de vulnérabilité à partir du moment où des dysfonctionnements graves peuvent être observés si ces composantes (population, activités économiques, centres décisionnels. . .) sont touchées d’une manière ou d’une autre par une catastrophe.

Tout d’abord, la zone d’étude concentre 217 720 habitants ⁹ (110 359 habitants pour la seule ville de Mulhouse, ce qui en fait la deuxième ville la plus peuplée d’Alsace, après Strasbourg). Cette population importante constitue le premier facteur de vulnérabilité de la zone d’étude car c’est le moteur de l’activité de l’agglomération. Malgré son 2^e rang en termes de population alsacienne et le 1^{er} au niveau du Haut-Rhin, la ville de Mulhouse n’a pas le statut de préfecture, c’est Colmar qui en bénéficie. Mulhouse possède cependant le statut de sous-préfecture. L’explication est historique puisque, lorsque les préfectures ont été créées, Mulhouse venait à peine d’être rattachée à la France et n’était encore qu’une petite ville, alors que Colmar dominait la région depuis 150 ans, avant le rattachement de Strasbourg.

L’activité économique est très développée dans le secteur mulhousien. L’histoire industrielle de la ville y est pour quelque chose, même si le secteur secondaire tend à décroître fortement,

⁶La rédaction du PPI proprement dit est en cours.

⁷Il n’y a pas de point source unique car les wagons sont mobiles et quotidiennement déplacés ; c’est pourquoi l’emprise ferroviaire est considérée comme “le point source” de la gare du Nord.

⁸Nous ne disposons des données de transport de matières dangereuses que pour la ville de Mulhouse et ses environs proches, c’est pourquoi nous avons prolongé le tracé de certains axes, bien qu’il y ait une part d’incertitude dans cette extrapolation.

⁹Population sans double compte des communes de la zone d’étude, d’après le recensement de la population de 1999 (source : INSEE).

au bénéfice du secteur tertiaire. En matière d'industrie, on peut noter la présence de grands groupes dans le secteur de la chimie (Rhodia), de l'automobile (PSA, qui rassemble à elle seule près de 14 % de la population active de la zone d'étude, avec plus de 12 000 employés¹⁰), du textile (DMC), du génie électronique (Clemessy). Le secteur tertiaire est très développé, comme en témoigne le technopôle de la Mer Rouge, à Mulhouse, qui réunit plus d'une quarantaine d'entreprises spécialisées dans les techniques de l'information et de la communication. Le dynamisme économique est renforcé par la présence d'une université et de deux écoles d'ingénieurs, dont la plus ancienne école de chimie française, qui est en étroite relation avec le milieu industriel au niveau local.

La position de Mulhouse à 10 km de l'Allemagne et 15 km de la Suisse constitue un véritable atout pour la région, du point de vue économique, car l'agglomération se trouve ainsi au cœur d'un vaste marché (160 millions d'habitants dans un rayon de 500 km¹¹), et en termes de communications, étant donné la richesse du réseau multi-modal. La carte générale de la zone d'étude (fig. 3.1) montre un réseau d'axes routiers importants, dont un réseau autoroutier la reliant à Strasbourg, Lyon, Paris, Marseille, l'Allemagne et la Suisse. Les axes ferrés sont également nombreux, en raison de la présence de deux gares (voyageurs et triage). L'aéroport franco-suisse de Bâle-Mulhouse (EuroAirport) se place à la cinquième position française pour le trafic passagers, deuxième pour le fret et relie la région aux principales métropoles européennes et internationales. Enfin, le transport fluvial est également développé (premier port fluvial de France pour le trafic de conteneurs, 20 % du trafic fluvial national).

Finalement, ces réseaux constituent un atout évident en termes de connexion avec les villes rhénanes et les grandes agglomérations européennes, mais ils peuvent également devenir un handicap. L'impression est celle d'un véritable enserrement de la ville de Mulhouse au milieu de ses axes de communication, qui freinent l'urbanisation et peuvent s'avérer contraignants en cas de crise : on imagine fort bien la difficulté rencontrée par les services de secours pour traverser des axes importants, si les ponts, nombreux car permettant de franchir les différents canaux, voies ferrées, autoroutes... , étaient détruits ou impraticables.

La carte 3.10 présente les principaux éléments vulnérables de l'agglomération de Mulhouse (mairies, hôpitaux, casernes de pompiers...) et quelques sites particuliers cités dans ce troisième chapitre.

3.1.6 Une prise de conscience des autorités mulhousiennes face à une méconnaissance des risques de la part de la population

On constate une prise de conscience croissante de la part des autorités mulhousiennes en matière de gestion des risques. Cette prise de conscience s'oppose à une méconnaissance importante des risques par la population, comme le montrent les résultats de l'enquête (cf. § 3.2.4.2). Pourtant, la population demande des réponses sur les risques encourus, comme ce fut notamment le cas lors de la fuite de produits chimiques à l'usine Rhodia de Chalampé, située à 20 km au nord de Mulhouse, le 18 décembre 2002.

Sept communes de la zone d'étude sont rattachées à la Communauté d'Agglomération Mulhouse Sud-Alsace¹² (CAMSA), une collectivité qui joue un rôle important dans la

¹⁰12 657 personnes travaillent dans le secteur automobile sur la commune de Sausheim. La population active de l'ensemble des communes où l'enquête a été menée se chiffre à 90 984 actifs, d'après le fichier SIRENE du quatrième trimestre 2004.

¹¹Source : site internet officiel de la CAMSA : www.agglo-mulhouse.fr. Consulté en juin 2006.

¹²Didenheim, Kingersheim, Lutterbach, Morschwiller-le-Bas, Mulhouse, Richwiller et Wittenheim.

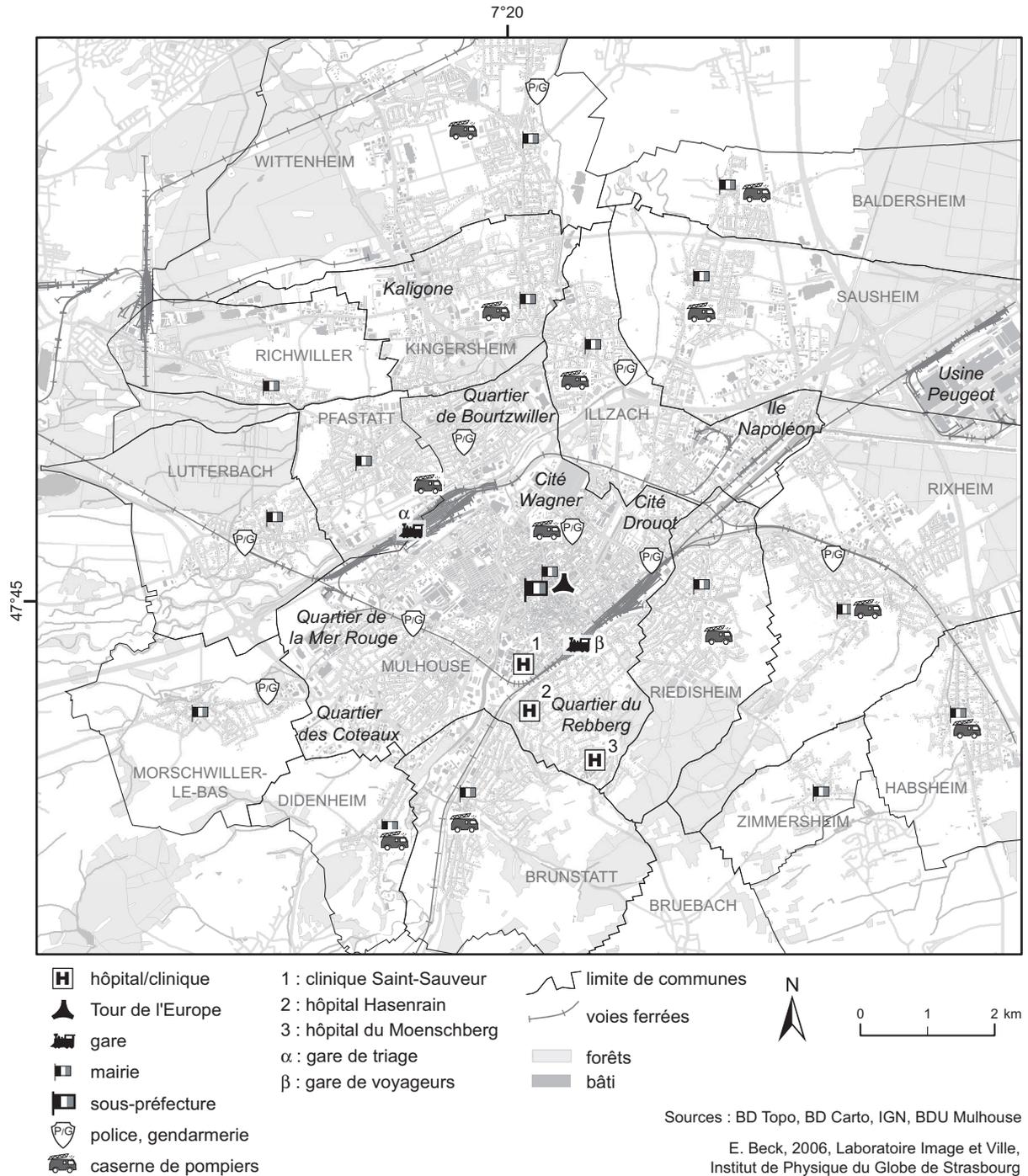


FIG. 3.10 – Principaux éléments vulnérables de la zone d'étude. La plupart des éléments vulnérables sont localisés dans la ville de Mulhouse. Cette carte se trouve également à la fin du manuscrit, sous la forme d'un encart, en couleurs.

gestion des risques de ces communes. En effet, elle est dotée d'une mission "développement durable", dont l'une des compétences porte sur l'amélioration de la qualité de vie des habitants par la maîtrise et la prévention des risques naturels (sismique, inondation) et technologiques (industriel).

Au sein de la mairie de Mulhouse, un service de la sécurité et des risques urbains a été récemment créé. Cette spécificité témoigne bien d'une préoccupation grandissante pour la prise en compte des risques dans la gestion de la ville. D'autres exemples permettent d'illustrer cette prise de conscience : l'organisation de réunions publiques d'information sur les risques ou de réunions d'information à destination des acteurs du risque¹³, la participation de la Ville de Mulhouse (et de la CAMSA) à des programmes de recherche sur les risques dans la région¹⁴, la mise en ligne sur le site internet de la Ville de Mulhouse d'une page d'information sur les risques, y compris la plaquette d'information sur les risques majeurs auxquels la commune est exposée. Enfin, la Ville de Mulhouse a mis en place un plan communal, le plan MOCAMU (MOBilisation CATastrophe MULhouse), dont l'objectif est de faire face à une catastrophe qui pourrait survenir à Mulhouse. Le plan, indépendant des plans Orsec et Rouge, définit une structure de commandement et une gestion des services adaptées à l'ampleur de la catastrophe. Il prévoit, en cas de catastrophe, la mobilisation du personnel de santé retraité, en renfort des services existants, le maintien des services municipaux essentiels, la réorganisation du centre hospitalier de Mulhouse après l'occurrence de la catastrophe, afin qu'il puisse augmenter sa capacité d'accueil.

Les autorités municipales mulhousiennes et celles de la CAMSA montrent une prise de conscience grandissante à l'égard de la problématique des risques et un investissement important dans les démarches de prévention. Les résultats de l'enquête menée auprès de la population attestent que les retombées de cette politique ne se font encore que peu ressentir pour le moment mais le travail d'acculturation au risque se fait sur le long terme : on peut donc s'attendre à observer des résultats plus encourageants dans quelques années.

La présentation du contexte général de l'étude a confirmé que l'agglomération de Mulhouse est susceptible d'être touchée par des séismes de magnitude relativement élevée et que l'activité anthropique dangereuse fait craindre des réactions en chaîne. Le contexte s'inscrit dans une logique d'interactions entre risques, d'où la nécessité de les identifier. La section suivante présente les résultats de l'étude appliquée à l'agglomération de Mulhouse.

3.2 Risques sismique et technologiques dans l'agglomération mulhousienne

L'étude des interactions entre risques nécessite une caractérisation préalable de chacun d'eux. Cette section s'organise de la façon suivante : d'abord sont présentés les résultats de l'estimation des effets de site sont présentés, puis la simulation d'un séisme important.

¹³Par exemple, la Journée d'information et d'échanges sur la prise en compte du risque sismique dans la région mulhousienne, le 19 février 2004, organisée par le BRGM.

¹⁴INTRUS : intégration et impact de risques naturels et technologiques en système urbain ; Interreg III n°3c.8 : microzonage de la région du sud du Rhin Supérieur.

3.2.1 Risque sismique

3.2.1.1 Effets de site

– Acquisition des données

Les effets de site ont été estimés à partir de deux méthodes, celle de Nakamura et celle des fonctions récepteurs.

Comme indiqué dans le deuxième chapitre, nous avons procédé à des mesures suivant deux maillages (annexe 6 et fig. 3.11).

Le nombre de points de mesure a été finalement réduit à 565, car certains sites théoriques étaient inaccessibles (dans l'eau, au milieu d'espaces privés. . .) et les contraintes de temps et moyens (humains et matériels) nous ont amenée à réduire le nombre de points de mesure. Leur localisation est représentée sur la carte 3.11.

Nous avons procédé à des enregistrements de bruit sismique suivant les deux maillages, avec trois stations différentes pour des raisons de disponibilité de matériel et dans l'objectif d'optimiser l'avancée des mesures en multipliant les équipes de travail. Trois sismomètres ont été utilisés, tous trois caractérisés par une période propre différente : Mark Products L4C (1 Hz), Lennartz LE3D (20 s) et Guralp CMG40T (30 s). La majorité des mesures a été réalisée avec le LE3D et le L4C.

Sur les 565 mesures effectuées, 548 ont été exploitées et traitées, 391 rapports spectraux se sont avérés interprétables. 157 spectres ont été abandonnés pour diverses raisons (des exemple de spectres non interprétés sont présentées en annexe 8) :

- un écart-type trop important, en raison d'une grande variabilité en amplitude du signal d'une fenêtre temporelle à l'autre ;
- un pic identifié dans des gammes de fréquences élevées (fréquences supérieures à 10 Hz) et révélant une structure superficielle ;
- une montée dans les basses fréquences, inexpliquée ;
- pas de pic identifiable en raison d'un spectre présentant beaucoup de pics ;
- pas de pic identifiable, malgré des amplifications supérieures à 1 ;
- pas de pic hormis dans des fréquences trop faibles par rapport à la période propre du sismomètre (notamment dans le cas du L4C).

La mise en œuvre de la méthode des fonctions récepteurs a nécessité l'installation de quinze stations durant deux mois (fig. 3.12). Trois sismomètres différents ont été utilisés : trois Lennartz LE3D (20 s), six CM40T Guralp (30 s) et six Lennartz LE1 (1 Hz). Outre le sismomètre, chaque station temporaire de mesure était équipée d'un système d'acquisition Agécodagis, d'un référentiel temporel (DCF ou GPS Titan) et de panneaux solaires alimentant une batterie. Le signal était enregistré en continu.

Nous avons localisé les stations de manière à couvrir le plus largement possible la zone d'étude tout en essayant de varier les conditions géologiques (fig. 3.12). Parmi les quinze stations, l'une d'entre elles a été installée à l'extérieur de l'agglomération (fig. 3.1), sur un site théoriquement au rocher, avec l'objectif de pouvoir servir de station de référence. Il s'agit de la station de Thann (THA).

Au cours de la campagne de mesures qui s'est échelonnée entre la mi-août et début octobre 2004, l'activité sismique s'est avérée relativement faible, alors que le début et la fin de

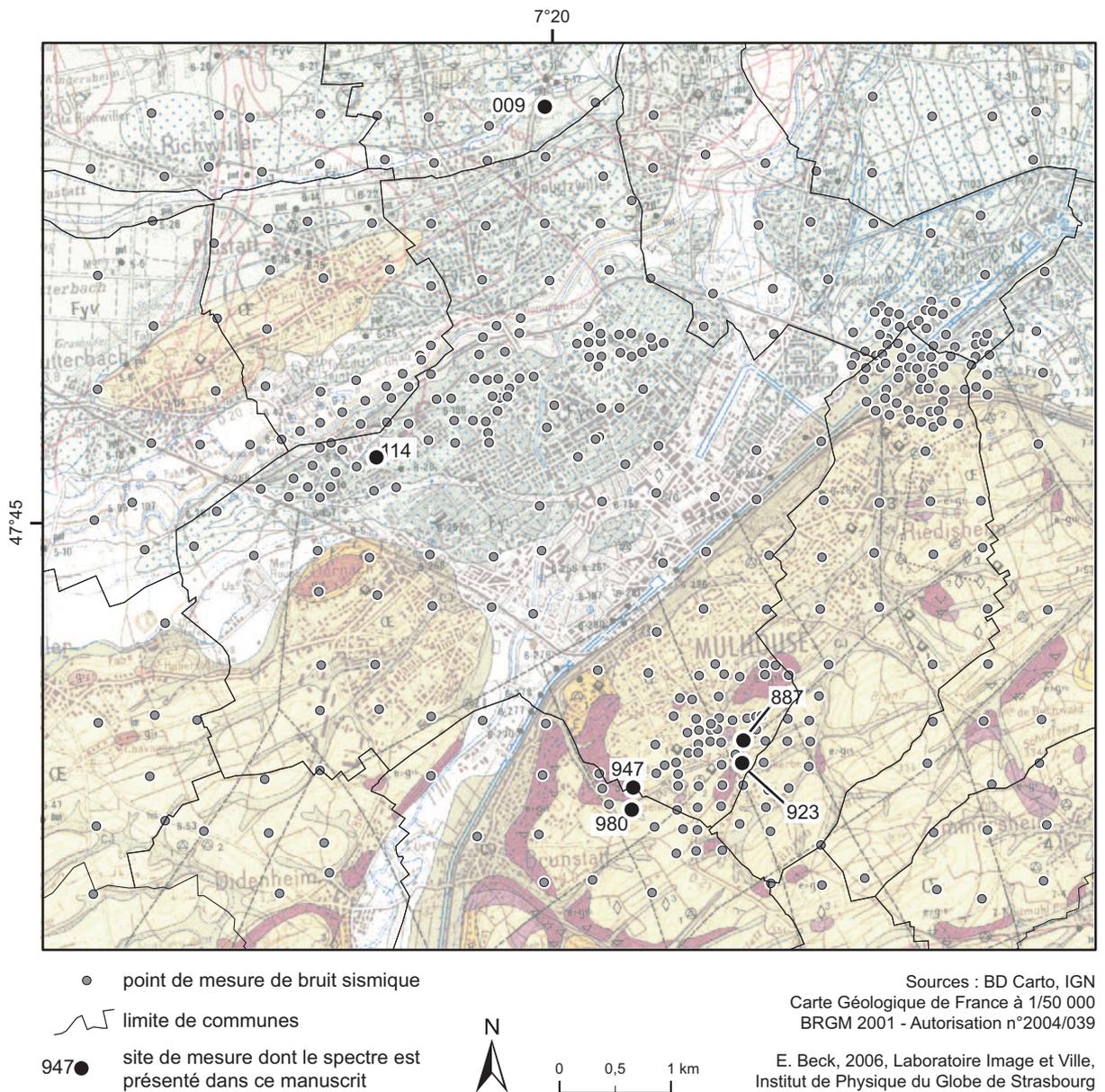


FIG. 3.11 – Localisation des points de mesures de bruit sismique. Le maillage le plus large est caractérisé par un échantillonnage d'un site de mesure tous les 500 m, le plus fin se concentre autour de sites sensibles : les mesures y sont effectuées tous les 100 à 200 m (cf. annexe 6) . Cette carte indique également la localisation de certains points cités dans le texte.

l'année 2004 ont été marqués par des tremblements de terre de magnitude suffisamment importante pour causer quelques dégâts (23/02/2004 : séisme de Roulans, $M_L = 5.1$; 4/12/2004 : séisme de Waldkirch, $M_L = 5.3$). En définitive, seuls huit séismes ont pu être enregistrés par au moins l'une des quinze stations. Quatre d'entre eux sont locaux, les quatre autres sont régionaux. Cependant, l'un d'entre eux n'a pas pu être exploité. Le tableau 3.1 décrit les caractéristiques des sept séismes pris en compte dans le calcul des rapports spectraux.

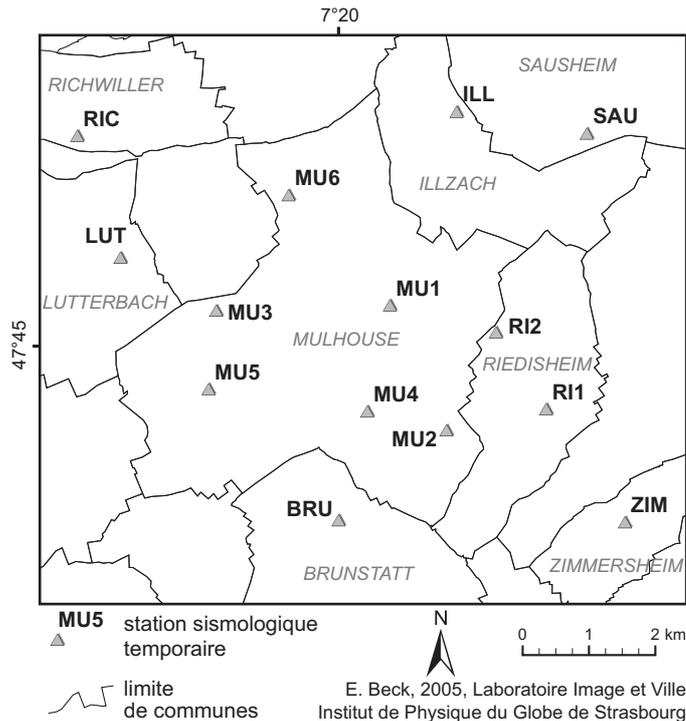


FIG. 3.12 – Localisation des stations sismiques temporaires. La station de Thann n'apparaît pas sur cette carte car elle est localisée en dehors de l'agglomération (15 km au WNW).

Localisation	Date	Heure	Lat. (°N)	Long. (°E)	Prof. (km)	ML	BRU	LUT	MU1	MU2	MU3	MU4	MU5	MU6	RIC	RI1	RI2	SAU	THA	ZIM	
ESE Colmar	19/08/2004	09:48	48,04	7,49	5	2,5				x			x	x		x	x			x	
Allemagne (Mannheim)	20/08/2004	23:35	49,70	8,00	10	2,7															x
ESE Colmar	21/08/2004	12:30	48,04	7,50	5	2,4				x	x	x	x					x		x	x
Italie	29/08/2004	00:04	46,27	12,15	10	4,1							x	x		x					
Italie	03/09/2004	21:35	46,45	8,06	5	2,5							x								x
Slovénie	14/09/2004	18:09	45,33	13,74	10	5,3	x										x				x
SW Colmar	30/09/2004	11:27	48,02	7,28	10	2,1											x				x

TAB. 3.1 – Caractéristiques des séismes pris en compte pour le calcul des rapports spectraux. Au final, sept séismes ont été pris en compte et les rapports spectraux ont pu être calculés pour dix stations.

Comme on peut le constater, peu de séismes ont été pu être pris en compte dans le calcul des rapports spectraux, cela pour diverses raisons :

- le signal n'a pas été enregistré car :
 - la station était hors-service (câble sectionné par une tondeuse à gazon) ;
 - la station était en panne car sous-alimentée, en raison d'un ensoleillement insuffisant ;
 - le disque était défectueux ;
 - la station n'était pas installée à cette date (les stations ont été mises en place et déconnectées à des dates différentes) ;
- le signal a été enregistré par la station mais :
 - le rapport signal sur bruit était trop faible ;
 - il était impossible de pointer les ondes S sur le sismogramme.

Au final, un rapport spectral a pu être calculé pour 10 des 14 stations du réseau temporaire.

– **Une bonne homogénéité spatiale des fréquences fondamentales**

Avant de nous intéresser à la répartition spatiale des valeurs de la fréquence fondamentale, il convient que nous comparions les résultats obtenus par les deux méthodes. La figure 3.13 illustre quatre exemples de rapports spectraux calculés pour quatre sites différents à l'aide des deux méthodes, Nakamura (figuré en noir) et fonctions récepteurs (figuré en gris). Les stations ayant enregistré un signal en continu, nous avons pu calculer des rapports spectraux à partir des enregistrements de bruit, afin de les comparer avec les rapports spectraux obtenus au même endroit à partir des sismogrammes. Le tableau 3.2 présente les valeurs de la fréquence fondamentale et de l'amplification obtenues à cette fréquence pour l'ensemble des stations temporaires à partir des deux méthodes (Nakamura et fonctions récepteurs).

Tout d'abord, les spectres montrent une bonne cohérence dans le cas des deux stations RI1 et ZIM (fig. 3.12 et 3.13), tant pour la fréquence fondamentale que pour l'amplification : un pic identique apparaît autour de 8 Hz (RI1) et 4.6 Hz (ZIM). A l'opposé, les spectres des stations BRU et MU3 ne montrent aucune cohérence, ni en fréquence, ni en amplification.

Méthode Station	Nakamura		Fonctions récepteurs	
	f_0	A_0	f_0	A_0
BRU	5.21	2.49	4.01	4.69
MU2	4.61	3.67	4.61	3.84
MU3	2.81	4.35	1.00	7.35
MU4	3.41	3.18	1.60	7.41
MU5	1.60	4.77	1.80	4.77
MU6	0.80	2.82	0.80	7.11
RI1	7.84	4.09	8.24	3.84
RI2	2.81	4.88	2.00	10.97
THA	7.01	4.10	0.80	7.53
ZIM	4.61	3.43	4.61	3.08

TAB. 3.2 – Fréquences fondamentales et facteurs d'amplification obtenus aux stations temporaires par les méthodes de Nakamura et des fonctions récepteurs. Une bonne cohérence des valeurs d'amplification et de fréquence obtenues par les deux méthodes est observée pour quatre des dix stations (MU2, MU5, RI1 et ZIM).

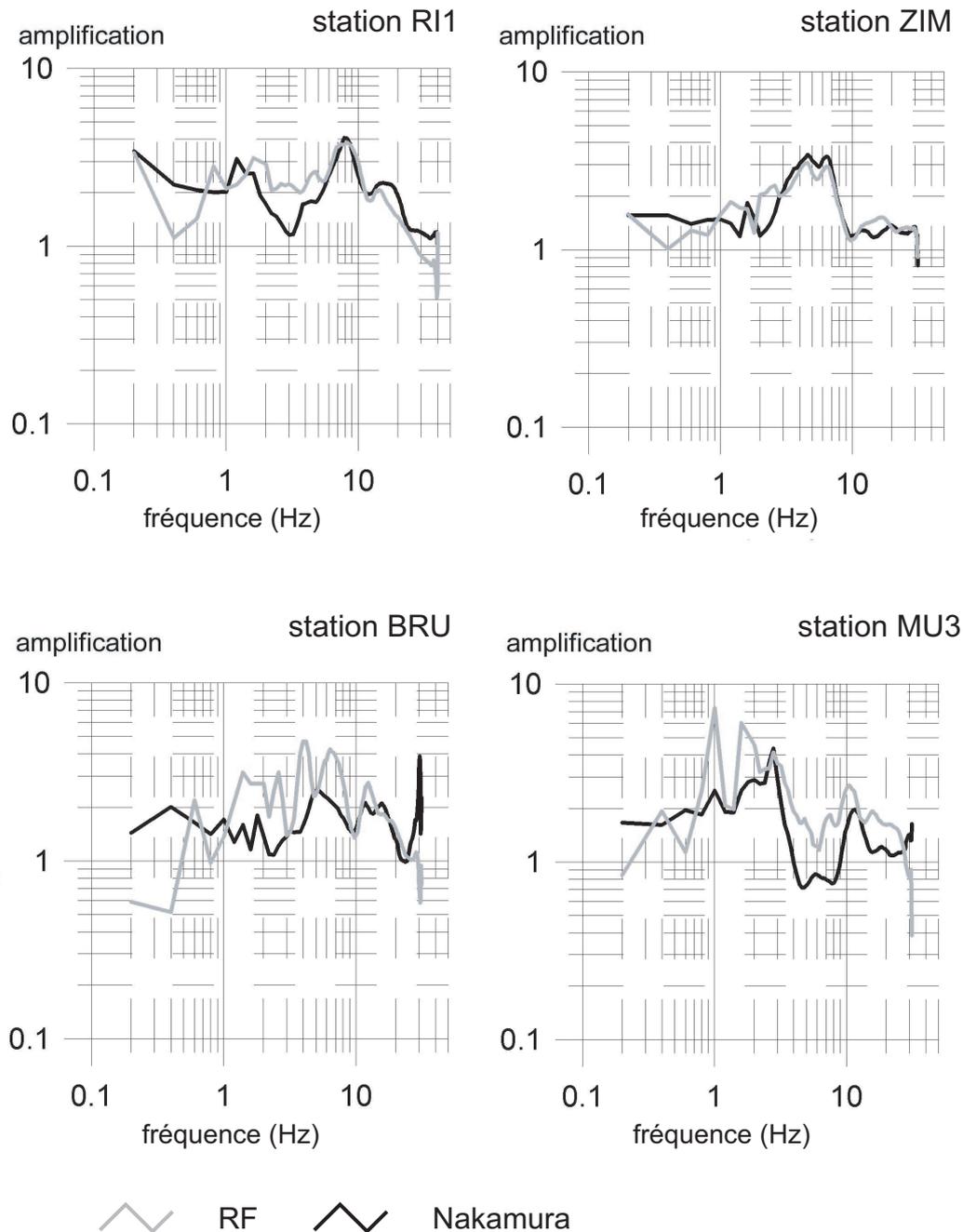


FIG. 3.13 – Exemples de spectres obtenus par la méthode de Nakamura et par celle des fonctions récepteurs aux stations temporaires. Les valeurs d'amplification et de fréquence obtenues par les deux méthodes sont identiques pour les stations RI1 et ZIM. En revanche, les stations BRU et MU3 ne montrent aucune cohérence en fréquence et en amplification.

Les valeurs de la fréquence fondamentale observées en chaque site ont été cartographiées afin de permettre l'analyse de leur distribution spatiale. Comme on l'observe sur la carte 3.14 et sur les histogrammes (fig. 3.15), la région est majoritairement caractérisée par des fréquences fondamentales comprises entre 0.8 et 2.5 Hz, avec deux pics (maximum d'effectifs) entre 0.8 et 0.9 Hz et entre 2.1 et 2.2 Hz, quelle que soit la qualité des spectres considérés (fig. 3.15). L'indicateur de qualité des spectres est également représenté sur la carte, sa distribution spatiale apparaissant très aléatoire.

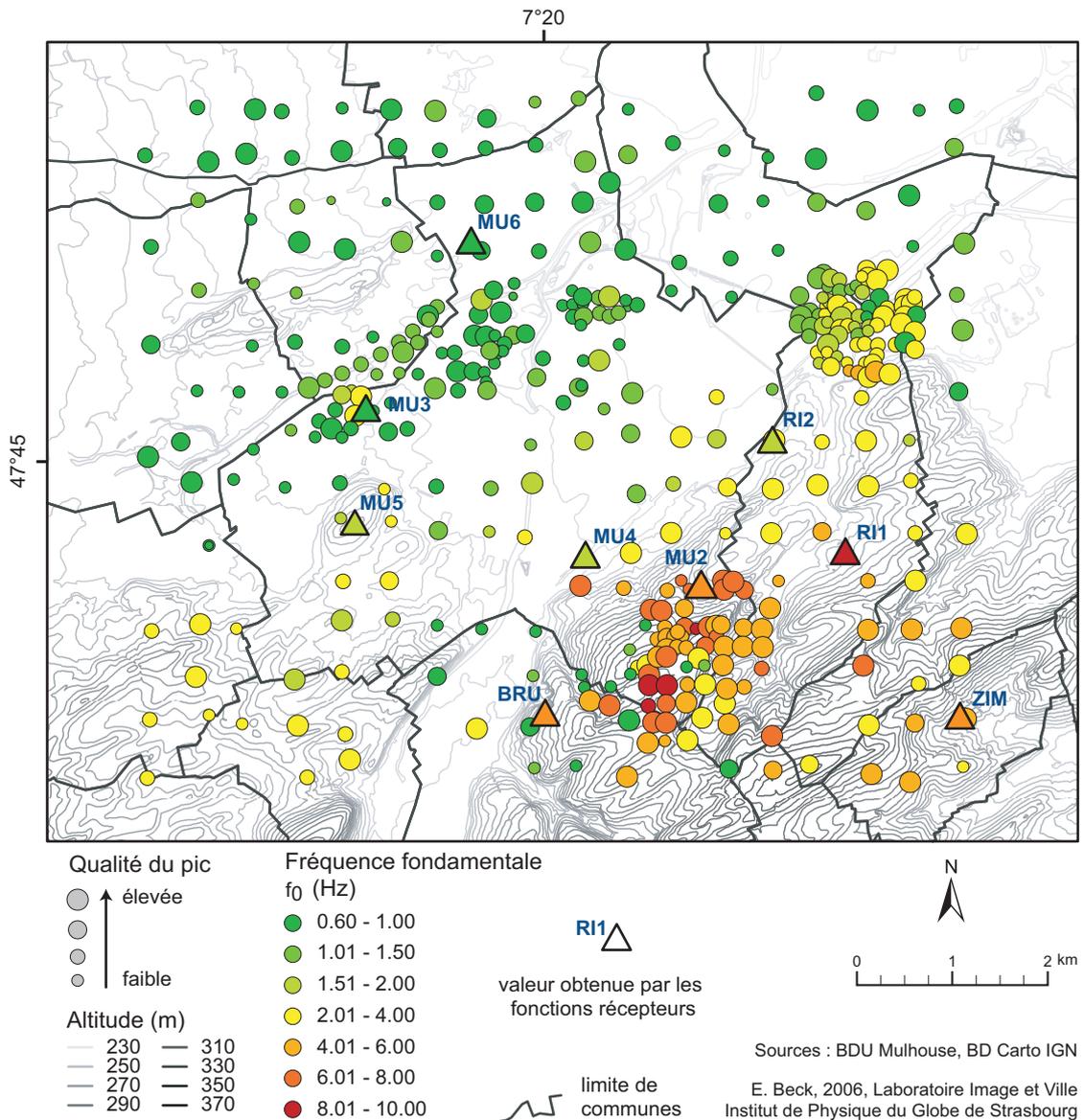
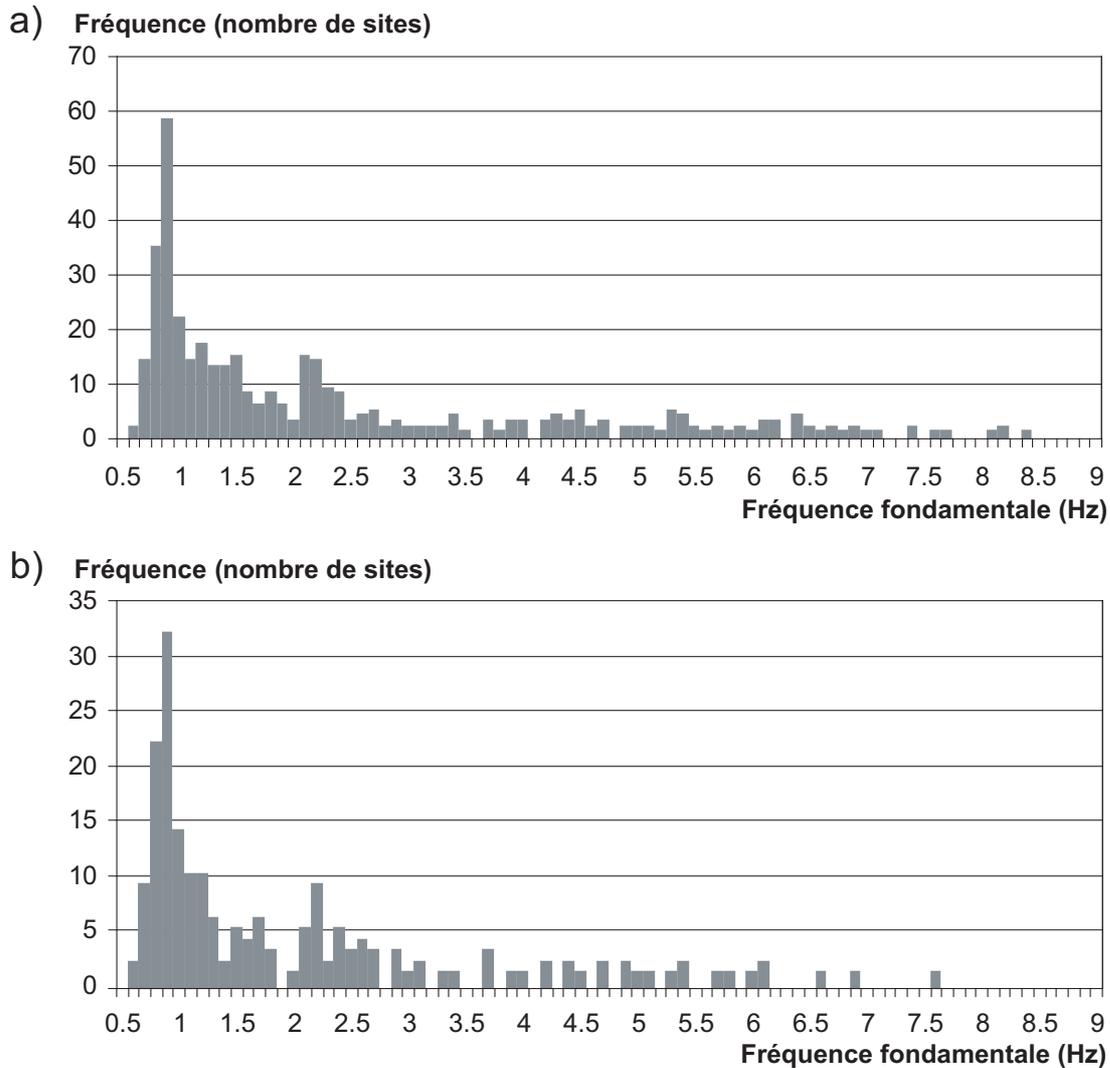


FIG. 3.14 – Carte des fréquences fondamentales de la région de Mulhouse (méthode de Nakamura et des fonctions récepteurs). Un gradient des valeurs est observé du nord-ouest (0.8-1.5 Hz) vers le sud-est (4-8 Hz). Les valeurs de fréquence fondamentale varient fortement sur de faibles distances dans le sud-est, en raison d'un contexte lithologique et structural complexe.

Un gradient général des valeurs de fréquences fondamentales du nord-ouest vers le sud-est de la carte apparaît nettement. Dans ce dernier secteur, les fréquences atteignent des valeurs plus élevées (autour de 4 à 8 Hz), ce que nous expliquons par la géologie de surface



Le premier histogramme (a) correspond à l'ensemble des points, alors que le second (b) ne prend en compte que les points du maillage lâche.

FIG. 3.15 – *Histogrammes des valeurs de fréquence fondamentale de la région de Mulhouse (méthode de Nakamura). Deux pics (maximum d'effectifs) sont observés : entre 0.8 et 0.9 Hz et entre 2.1 et 2.2 Hz.*

caractérisant la colline du Reberg, qui correspond au horst de Mulhouse (fig. 3.2 et 3.10). En effet, le horst, constitué de roches tertiaires (marnes, molasse, calcaires), est majoritairement recouvert d'une couche de loess datant du Würm (fig. 3.4), alors que les autres secteurs de la région sont caractérisés par des alluvions plus ou moins récentes.

Toujours dans le secteur sud-est, l'hétérogénéité des valeurs de la fréquence fondamentale est surprenante car elles varient rapidement sur de courtes distances (quelques centaines de mètres). Cela est particulièrement significatif pour les sites 947 et 980, qui montrent des formes de spectres assez différentes (fig. 3.16 et 3.11). Le spectre du site 947 montre un pic à 0.89 Hz et le spectre du point 980 un pic à 7.40 Hz, alors que les deux sites ne sont distants que de 200 m. Le même phénomène s'observe pour les sites 887 et 923, espacés de 230 m : le spectre du site 887 est caractérisé par deux pics, l'un autour de 1 Hz, l'autre entre 6 et 7 Hz, alors que le site 923 ne présente qu'un seul pic aux alentours de 8 Hz (fig. 3.17 et 3.11). Cette hétérogénéité peut être expliquée par la complexité géologique du horst de Mulhouse, tant d'un point de vue lithologique, car le secteur montre une variété importante de terrains (loess du Quaternaire, calcaires et marnes du Tertiaire...) que structural, car le horst correspond à une structure faillée, qui complexifie la géométrie tridimensionnelle des couches géologiques.

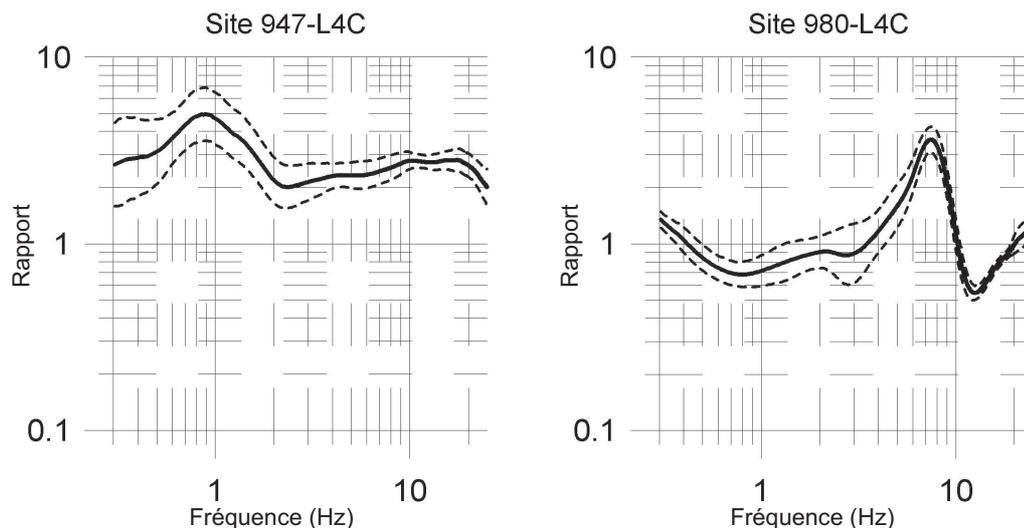


FIG. 3.16 – Rapports H/V des points 947 et 980. Les points 947 et 980 sont distants de 200 m : cette figure indique la variabilité des spectres observée sur de faibles distances.

– Relation entre la fréquence fondamentale et la géologie de surface : validation par le modèle 1D

La plupart des fréquences fondamentales peuvent être mises en relation avec la géologie de surface même si, dans certains cas, la géométrie tridimensionnelle des couches géologiques semble être à l'origine de formes complexes des spectres (nombreux pics). La figure 3.18 montre la distribution des valeurs de fréquence fondamentale en fonction de la géologie de surface caractéristique de chaque site.

Certains types de formations géologiques comme les alluvions actuelles de l'Holocène (sables et graviers ; formation n°2 sur la figure 3.18) et les anciennes alluvions vosgiennes

du Würm (formation n°8 sur la figure 3.18) sont caractérisés par des fréquences relativement faibles et regroupées (respectivement entre 0.6 et 2.4 Hz et entre 0.6 et 1.4 Hz). Cela indique la relative homogénéité des épaisseurs de ces formations superficielles.

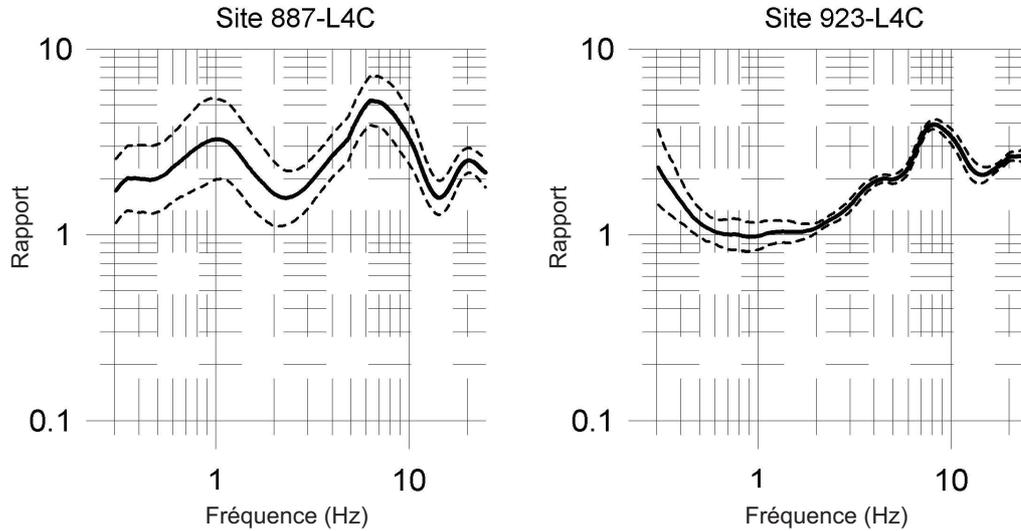


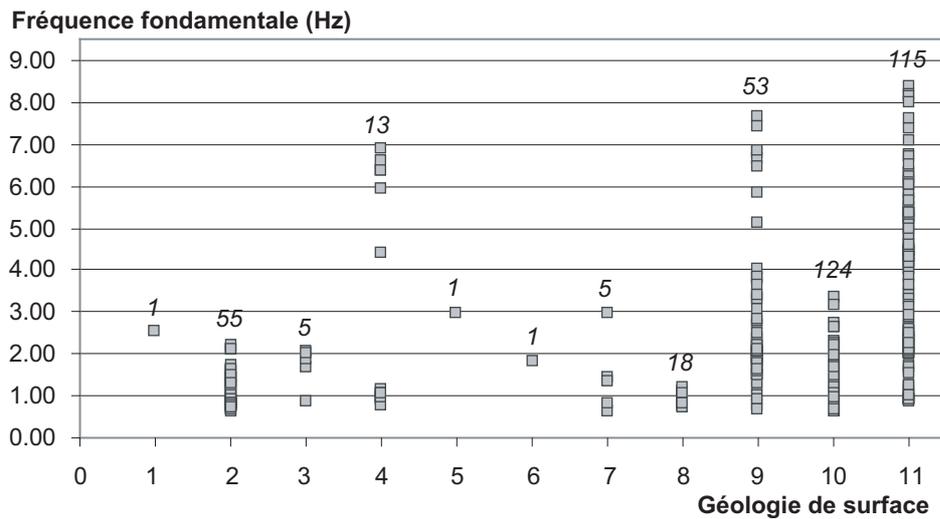
FIG. 3.17 – *Rapports H/V des points 887 et 923. La variabilité des spectres est également observée pour les points 887 et 923, distants de 230 m.*

A l'inverse, les formations n°9 (cônes de déjection, limons et loëss) et 11 (loëss et lehms anciens et récents du Würm) montrent des valeurs beaucoup plus dispersées. Cela peut être expliqué par les variations d'épaisseur des couches superficielles (notamment de loëss) et de configuration structurale qui peuvent être rencontrées dans la région de Mulhouse, et plus particulièrement dans les secteurs recouverts par ces formations peu consolidées (ouest et sud-est). Les valeurs de fréquence fondamentale basses obtenues pour les formations n°9 et 11 sont assez surprenantes, étant donné les caractéristiques géomécaniques des loëss (les vitesses des ondes S sont en général assez faibles) et les faibles épaisseurs rencontrées dans la zone d'étude. Ces valeurs peuvent correspondre à des structures plus profondes, comme nous allons le discuter dans les paragraphes suivants.

La corrélation entre la géologie de surface et les valeurs des fréquences fondamentales peut être analysée par un modèle 1D qui sert à calculer des valeurs théoriques. Parmi les différentes relations listées au paragraphe 2.1.2.5, la moyenne pondérée des vitesses des ondes S est particulièrement adaptée aux données dont nous disposons (équ. 2.2, [Dobry *et al.*, 1976]). L'application de ce modèle 1D, adapté si la structure géologique est tabulaire, requiert d'avoir des données sur les épaisseurs des couches superficielles et les vitesses d'ondes S, qui peuvent être fournies par les forages et les mesures SASW.

Certains des forages localisés dans la région d'étude, comme le forage 04136X0006 ¹⁵ (tab. 3.4 et annexe 7), montrent une interface à 67 m entre les alluvions récentes et des dépôts plus anciens (marnes du Stampien). Des mesures de SASW ont été réalisées par le BRGM en 2004 dans le cadre du programme Interreg III [Granet et Boulanger, 2004 ; Roullé *et al.*, 2006]. Une des mesures SASW réalisées dans ce cadre se situe à proximité du site 114 (fig. 3.19 et 3.11) et du forage 04136X0006 (tab. 3.4 et annexe 7). Elle indique une valeur

¹⁵Source : banque du sous-sol, BRGM.



1	Eboulis.
2	Holocène : alluvions actuelles : sables et graviers.
3	Zone inondable.
4	Latdorfien : calcaires à Mélanies.
5	Latdorfien : marnes en plaquettes.
6	Oligocène : Chattien : molasse alsacienne.
7	Würm : alluvions anciennes rhénanes.
8	Würm : alluvions anciennes vosgiennes.
9	Würm : cônes de déjection au débouché des vallées latérales. Loess sableux et colluvions des vallées latérales. Limons de ruissellement au pied des collines de loess.
10	Würm : faible couverture de limons sableux sur la basse terrasse.
11	Würm : loess et loess-lehms récents et anciens.

FIG. 3.18 – Distribution des valeurs de la fréquence fondamentale selon la géologie de surface caractéristique de chaque site. Certaines formations (n°2, par exemple) sont caractérisées par des fréquences fondamentales homogènes, alors que d'autres (n°9 et 11) montrent une grande dispersion des valeurs. Les chiffres en italique indiquent le nombre de mesures effectuées sur chaque formation géologique de surface.

moyenne de vitesse d'ondes S de 350 m/s (alluvions) sur les 30 premiers mètres. Ainsi, à partir de la relation 2.2 et de ces valeurs de vitesse et d'épaisseur, on devrait observer une fréquence fondamentale de 1.3 Hz. Cependant, cette fréquence n'apparaît pas clairement sur le spectre du site 114 (localisé à 80 m du forage 04136X0006), puisque celui-ci indique une valeur de 0.86 Hz (fig. 3.19). Cette valeur pourrait s'expliquer par le fait que la structure n'est pas 1D, ou révéler une structure plus profonde, non mise au jour par le forage.

Numéro de couche	Profondeur (m)	Épaisseur (m)	Lithologie	Stratigraphie
Couche 1	0 - 9.70	9.70	Sable, graviers, galets	Quaternaire
Couche 2	9.70 - 32.50	22.80	Sable, galets	Quaternaire
Couche 3	32.50 - 67.00	34.50	Galets	Quaternaire
Couche 4	67.00 - 447.20	380.20	Marnes grises	Stampien inférieur
Couche 5	447.20 - 647.54	220.34	Sables schisteux, sel	Stampien inférieur
Couche 6	647.54 - 650.24	2.70	Potasse	Stampien inférieur
Couche 7	650.24 - 679.10	28.86	Sables schisteux, sel	Stampien inférieur
Couche 8	679.10 - 691.60	12.50	Sables schisteux	Stampien inférieur

TAB. 3.4 – Forage 04136X0006 : épaisseur, lithologie, stratigraphie des différentes couches (source : BSS, BRGM). Ce forage montre une interface à 67 m de profondeur entre des alluvions quaternaires et des marnes du Stampien inférieur.

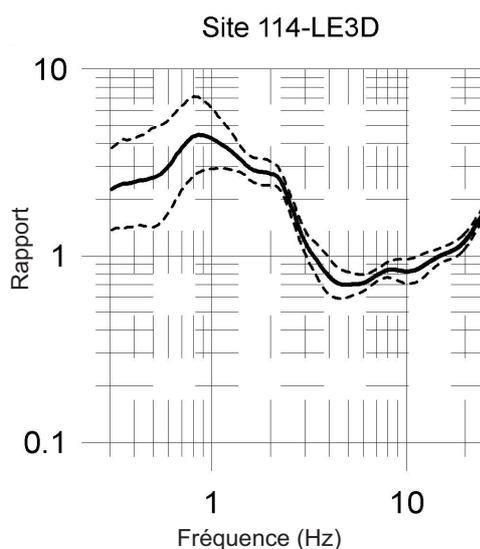


FIG. 3.19 – Rapport H/V du site 114 (L_4C). La fréquence fondamentale de ce site est estimée à 0.86 Hz, d'après le rapport H/V , alors que la fréquence théorique calculée à l'aide du modèle 1D est égale à 1.30 Hz.

D'une manière générale, les faibles valeurs de fréquence fondamentale (majoritairement comprises entre 0.8 et 0.9 Hz, comme montré par les histogrammes de la figure 3.15) ne concordent pas avec les vitesses d'ondes S et les épaisseurs des formations superficielles : les valeurs de fréquence fondamentale pourraient correspondre à des formations plus profondes, probablement tertiaires [Roullé *et al.*, 2006].

Les fréquences fondamentales estimées à partir de la méthode de Nakamura sont élevées dans le secteur du Rebberg (fig. 3.14). Pour les comparer avec les valeurs estimées à l'aide du modèle 1D, il est nécessaire de disposer de données d'épaisseurs de couches superficielles et de vitesses d'ondes S. Or, très peu de forages ont été effectués dans ce secteur. Parmi ceux-ci, d'après la BSS, ils n'atteignent que rarement une profondeur supérieure à 12 m. Cependant, la carte géologique¹⁶ indique que les loëss et lehms peuvent atteindre une épaisseur de 10 à 20 m sur le Rebberg. Si l'on considère une vitesse des ondes S comprise entre 300 et 400 m/s, comme l'a mesurée le BRGM [Granet et Boulanger, 2004], on peut s'attendre à des fréquences fondamentales théoriques comprises entre 3.75 et 10 Hz, ce qui est équivalent aux fréquences fondamentales obtenues dans le secteur du Rebberg (entre 4 et 8 Hz). Nous devrions cependant pouvoir observer les mêmes valeurs dans d'autres secteurs recouverts par du loëss (sud-ouest et nord-ouest ; fig. 3.5), ce qui n'est pas le cas. Malheureusement, aucun forage n'a été réalisé dans ces secteurs et la carte géologique ne donne pas d'indications sur les épaisseurs de ces formations. On suppose cependant que ces différences de f_0 sont dues à des épaisseurs différentes des dépôts. D'une manière générale, la profondeur maximale atteinte par les forages ne permet pas de valider les fréquences fondamentales calculées à l'aide du modèle 1D car la majorité des forages (70 %) n'atteint pas 30 m de profondeur et 45 % d'entre eux ne descendent pas au-delà de 20 m ; ces derniers ne montrent d'ailleurs aucune interface entre les dépôts quaternaires et les formations tertiaires.

– Spatialisation des valeurs de fréquence fondamentale : interpolation par krigage

Nous avons procédé à une spatialisation des valeurs de fréquence fondamentale afin de pouvoir disposer d'une information en tout point de l'espace, dans l'objectif de les comparer avec les valeurs de fréquence fondamentale des bâtiments.

Etant donné l'homogénéité générale des valeurs de fréquences fondamentales (excepté dans le secteur sud-est), nous avons procédé à une interpolation par **krigeage** (fig. 3.20) avec une résolution spatiale de 100 m. D'autres méthodes d'interpolations ont été testées (spline et distance inverse), mais les résultats n'ont pas été concluants (lissage trop important des valeurs et "yeux de bœuf"). Cette spatialisation met en évidence la tendance générale observée sur la carte des valeurs ponctuelles, c'est-à-dire un gradient des valeurs du nord-ouest au sud-est, avec des valeurs plus élevées dans le sud-est.

– L'hétérogénéité spatiale des valeurs de facteur d'amplification

D'après les récents travaux de S. Bonnefoy-Claudet, "la méthode H/V n'est pas capable de donner une estimation correcte de la valeur de l'amplification d'un site", notamment parce que "l'amplitude du pic H/V localisé à la fréquence de résonance varie au cours du temps" [Bonnefoy-Claudet, 2004, p. 141 et 225]. Les amplifications obtenues par les spectres H/V de bruit ne peuvent être prises en compte de manière absolue et, si on s'en tient à ses conclusions, il n'est pas possible de les prendre en compte de manière relative.

¹⁶Carte géologique de la France au 1/50 000, n° 413, "Mulhouse-Müllheim", publiée en 1976 par le BRGM.

La validité de l'amplification calculée à partir des H/V de bruit fait l'objet de controverses (cf. § 2.1.2.3), c'est pourquoi il nous a semblé important de vérifier les conclusions de cet auteur à l'aide de nos données et dans notre contexte d'étude.

Dans un premier temps, les valeurs d'amplification obtenues par les H/V de bruit et de séisme ont été cartographiées, de manière à identifier ou non une cohérence spatiale de ces valeurs. Etant donné que certains spectres ont une faible qualité en raison d'un écart-type élevé (ce qui influence le facteur d'amplification observé), seuls les spectres caractérisés par un indice de qualité égal à 1 ou 3 (cf. § 2.1.2.3 et fig. 2.9) ont été cartographiés sur la figure 3.21. Cette carte indique une valeur moyenne d'amplification autour de 4 (+/- 1), puisque 53 % des rapports H/V cartographiés montrent un facteur d'amplification compris entre 3 et 5. Une quinzaine de spectres, représentés sur la carte par des carrés blancs à contour noir épais, n'ont pas montré d'amplification (spectre plat) ; ils sont principalement localisés dans la partie nord de la zone d'étude. La grande variabilité spatiale des amplifications à la fréquence fondamentale sur de courtes distances et l'absence d'homogénéité spatiale suggèrent également l'absence d'impact de la géologie de surface ou de la topographie sur les valeurs d'amplification. On peut alors s'interroger sur l'origine de cette variabilité spatiale : est-ce lié au protocole de mesure ? A l'influence de la structure 3D ? Ou est-ce le reflet de l'incapacité de la méthode de Nakamura à estimer les facteurs d'amplification ?

Dans un deuxième temps, nous avons procédé à quelques tests pour mesurer la variation dans le temps de l'amplification obtenue par les H/V de bruit sismique. Pour cela, nous avons réalisé deux mesures avec une station mobile d'enregistrement en un même site (site 009) et à deux moments différents, l'une à 11h30 et l'autre à 23h00. Il s'agissait d'un site particulièrement perturbé, situé en bordure d'une voie passante. La seconde expérience a consisté à comparer les rapports spectraux de bruit enregistrés par deux stations temporaires, l'une étant localisée dans un champ (ZIM), l'autre en plein centre ville (RI2). Nous avons testé l'influence de l'heure (1h00 et 17h00) et du jour de la semaine (jeudi et dimanche) sur les rapports spectraux (fréquence et amplification ; fig. 3.22).

Les résultats sont mitigés dans le cas du site 009, pour lequel on observe une différence de 1 en termes d'amplification, principalement dans les basses fréquences.

Dans le cas des stations temporaires, le rapport est très stable dans le temps, qu'il s'agisse du site calme ou du site bruyé. Le protocole de mesure peut jouer sur les résultats, puisque dans un cas nous avons une station mobile, dans l'autre cas une station stabilisée, installée depuis plusieurs jours. Cependant, ces quelques tests ne permettent pas de conclure comme S. Bonnefoy-Claudet sur la variabilité du rapport H/V dans le temps en termes d'amplification. Davantage de tests seraient nécessaires pour confirmer ou informer les conclusions de cet auteur.

Lorsque l'on compare les rapports spectraux obtenus en un même site à l'aide des deux méthodes (fig. 3.13, tab. 3.2), on remarque une bonne cohérence en termes d'amplification pour les stations MU2, RI1, ZIM et MU5. Pour la station MU6, l'analyse des différences d'amplification montre que les valeurs issues des traitements de sismogrammes (fonctions récepteurs) sont supérieures à celles calculées à partir de la méthode de Nakamura.

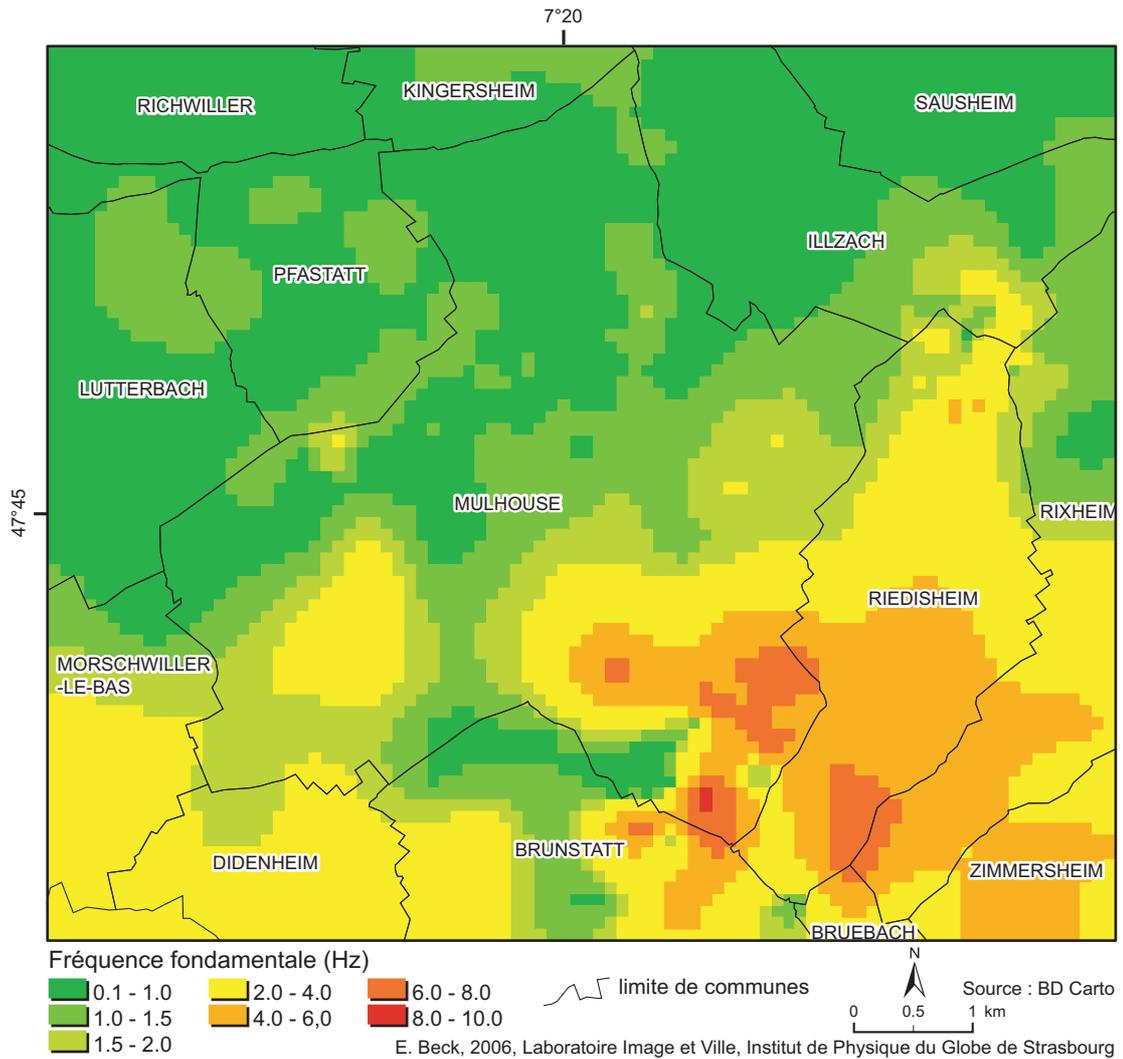


FIG. 3.20 – Interpolation par krigeage des valeurs de fréquence fondamentale estimées à partir de la méthode de Nakamura. Un gradient des valeurs de fréquence fondamentale du nord-ouest au sud-est est mis en évidence, avec des valeurs plus élevées dans le sud-est.

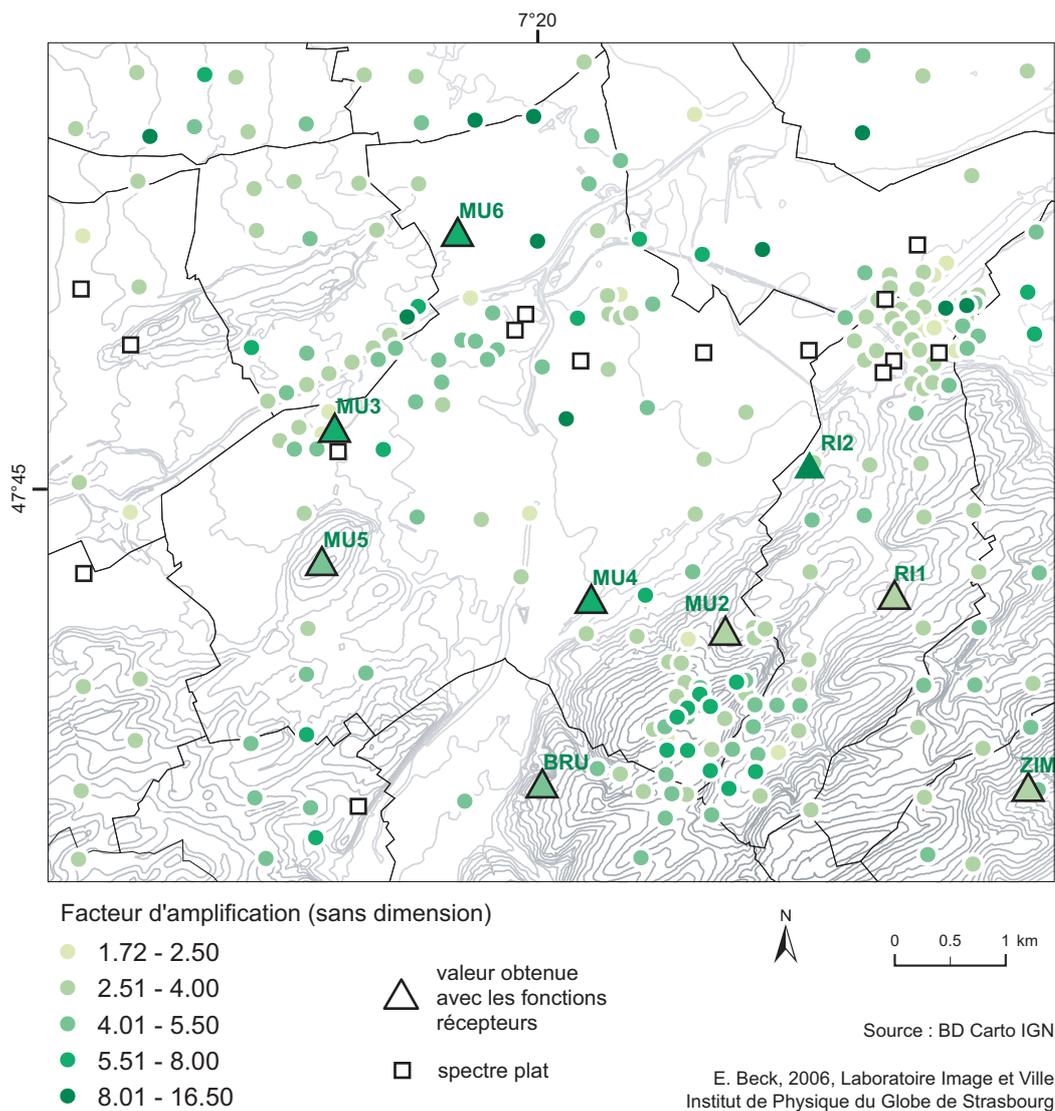


FIG. 3.21 – Facteurs d'amplification obtenus par la méthode de Nakamura. Seuls les spectres de qualité 1 et 3 sont représentés. La majorité (53 %) des spectres figurés sur cette carte montrent une amplification comprise entre 3 et 4.

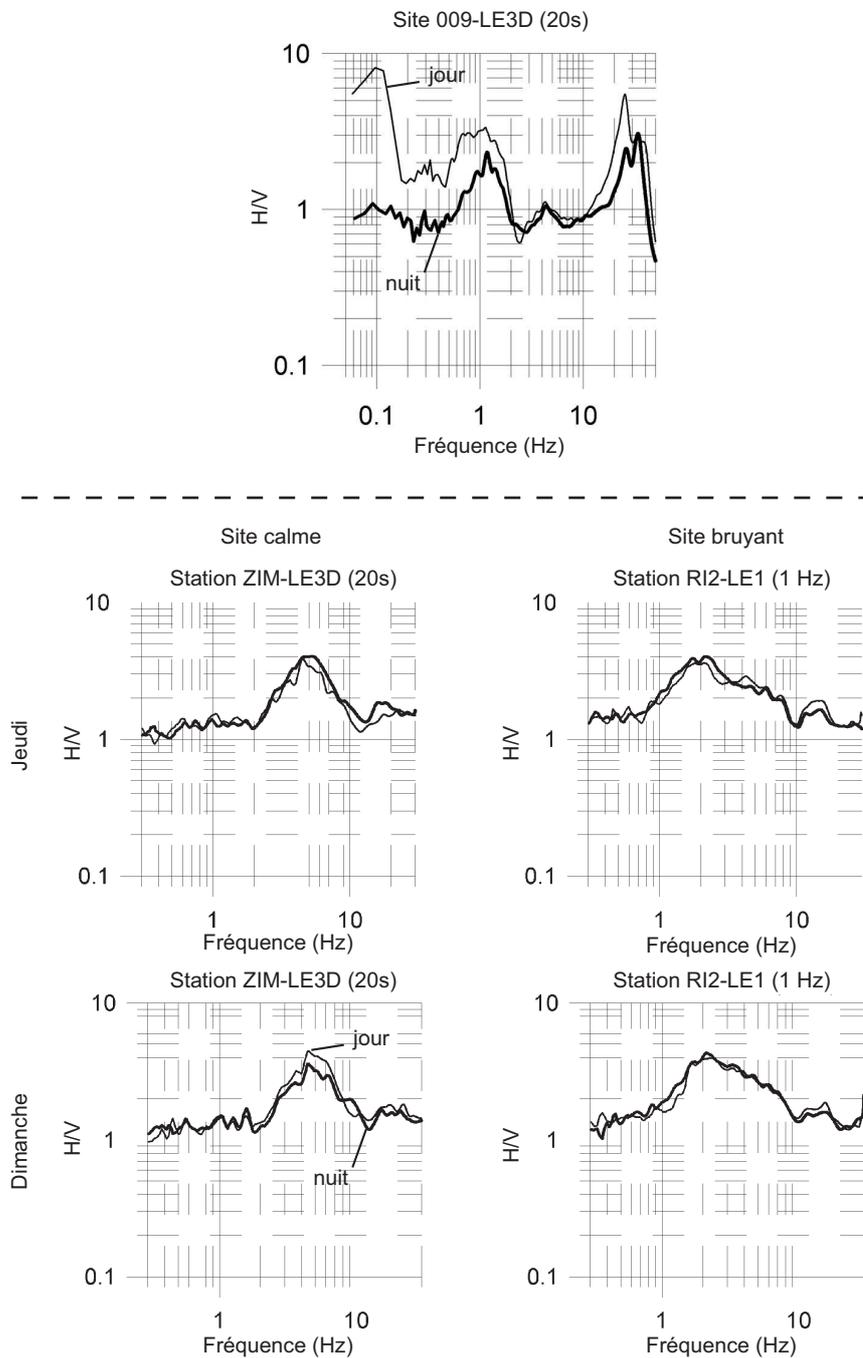


FIG. 3.22 – Influence de l'heure et du jour sur les rapports spectraux (méthode de Nakamura). Spectre supérieur : mesure faite de jour (courbe fine) et de nuit avec une station mobile. L'amplification est plus importante pour la mesure réalisée en journée, surtout aux basses fréquences. Spectres inférieurs : mesures faites de jour et de nuit, jeudi et dimanche, sur des stations temporaires caractérisées par des conditions de site différentes (site bruyant/site calme). Le rapport spectral H/V est très stable en amplification dans le temps.

Les résultats sont mitigés ; sur l'ensemble des dix stations pour lesquelles un rapport a pu être calculé, on obtient les résultats suivants (tab. 3.2) :

- fréquence fondamentale et facteur d'amplification quasiment identiques : stations MU2, MU5, RI1 et ZIM ;
- fréquence fondamentale quasiment identique et facteur d'amplification différent (supérieur pour les fonctions récepteurs) : station MU6 ;
- fréquence fondamentale et amplifications différentes : stations BRU, MU3, MU4, RI2 et THA.

La moitié des rapports spectraux présente des valeurs de fréquence fondamentale identiques quelle que soit la méthode employée, 40 % donnent des valeurs d'amplification presque égale pour le pic de fréquence fondamentale. Ces résultats sont encourageants, même si davantage d'enregistrements de séismes seraient nécessaires pour valider la bonne cohérence entre les résultats obtenus par l'application des deux méthodes. Notons également que la station THA n'est pas exempte d'effets de site ; elle ne peut dans ce cas constituer un site de référence, puisque des amplifications de 4.61 ont été observées (méthode de Nakamura).

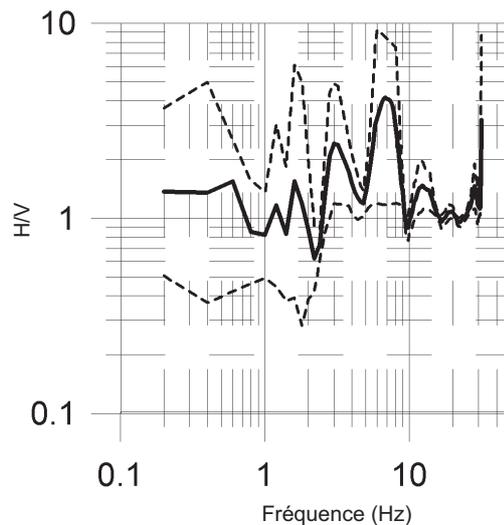


FIG. 3.23 – Rapport H/V de bruit de la station THA. L'amplification de 4.61 exclut de considérer la station THA (Thann) comme un site de référence.

Les valeurs d'amplification obtenues à partir des enregistrements de bruit sismique aux stations temporaires sont proches des valeurs obtenues aux sites de mesure H/V de bruit (maximum d'effectifs entre 3 et 5). En effet, un minimum est observé à la station BRU (2.49), un maximum à la station RI2 (4.88), et huit stations sur dix montrent une amplification comprise entre 3 et 5 (tab. 3.2). Cela montre l'homogénéité des valeurs d'amplification observées dans notre zone d'étude et obtenues par la méthode de Nakamura, quel que soit le protocole de mesure (station mobile ou station temporaire).

– Spatialisation des amplifications

La spatialisation des amplifications est une étape délicate, étant donné la grande variabilité spatiale des valeurs obtenues par la méthode de Nakamura. L'homogénéité des valeurs de fréquence fondamentale n'est plus observée ici (fig. 3.21) ; au contraire, cette variabilité spatiale des valeurs d'amplification interdit toute interpolation. Aussi, nous avons souhaité tirer profit de la complémentarité entre les deux méthodes d'estimation des effets de site. Dans un premier temps, une partition¹⁷ de l'espace a été réalisée à partir des valeurs de la fréquence fondamentale obtenues par la méthode H/V, étant donné leur cohérence spatiale. Elle a permis d'établir des zones homogènes, dont les limites ont été déterminées principalement à partir de la répartition spatiale des valeurs de fréquences fondamentales et de la géologie de surface. Des incertitudes subsistent, notamment lorsque certains secteurs montrent une hétérogénéité spatiale des f_0 , ou lorsque les densités de points sont trop faibles.

Cette partition de l'espace s'appuie sur une hypothèse forte : s'il y a une cohérence des fréquences fondamentales dans un secteur donné, il y a aussi cohérence des facteurs d'amplification. Cette hypothèse se justifie par la grande homogénéité spatiale des valeurs de fréquence et la bonne corrélation entre les fréquences fondamentales observées et la géologie de surface, à laquelle les facteurs d'amplification sont également corrélés.

Dans un second temps, une valeur d'amplification a été attribuée à chaque zone obtenue : cette valeur correspond à la moyenne des amplifications déterminées à l'aide de la méthode des fonctions récepteurs pour les stations se trouvant dans chaque zone. En définitive, quatre zones homogènes d'effets de site ont été distinguées (fig. 3.24).

La première zone est localisée sur le horst de Mulhouse, dans le sud-est de la zone. Elle n'occupe qu'une faible surface, avec des altitudes élevées. Les valeurs de fréquence fondamentale varient entre 2.11 et 8.36 Hz (moyenne : 5.53 Hz ; mode : 4.50 Hz). Les amplifications, quant à elles, sont faibles par rapport à l'ensemble de la zone (3.08 à la station ZIM et 3.84 aux stations RI1 et MU2 ; moyenne : 3.59).

La deuxième zone se situe dans le sud-ouest de la région d'étude. Les fréquences fondamentales sont comprises entre 1.56 et 2.88 Hz (moyenne : 2.25 Hz ; mode : 2.40 Hz) ; la seule valeur de fréquence obtenue est de 4.77 (station MU5). La zone correspond au horst de Mulhouse (plaquages de loess sur formations tertiaires).

La troisième zone occupe quasiment la totalité de la moitié nord de la zone d'étude des effets de site ; les valeurs de fréquence fondamentale varient entre 0.60 et 4.00 Hz (moyenne : 1.11 Hz ; mode : 0.90). Les valeurs d'amplification obtenues dans ce secteur sont de 4.69 (station BRU), 7.11 (station MU6), 7.35 (station MU3) et 7.41 (station MU4) et la moyenne est égale à 6.64. D'un point de vue géologique, cette zone est caractérisée par d'épaisses alluvions vosgiennes et rhénanes.

¹⁷Le terme de "partition" est employé ici pour définir une discrétisation de l'espace en des zones homogènes du point de vue des fréquences fondamentales. Le terme de zonage n'a volontairement pas été utilisé, car il possède une connotation particulière, celle d'un plan réglementaire à partir duquel sont définies des contraintes en termes d'occupation et d'utilisation du sol et, dans le cadre du risque sismique, de normes de construction particulières.

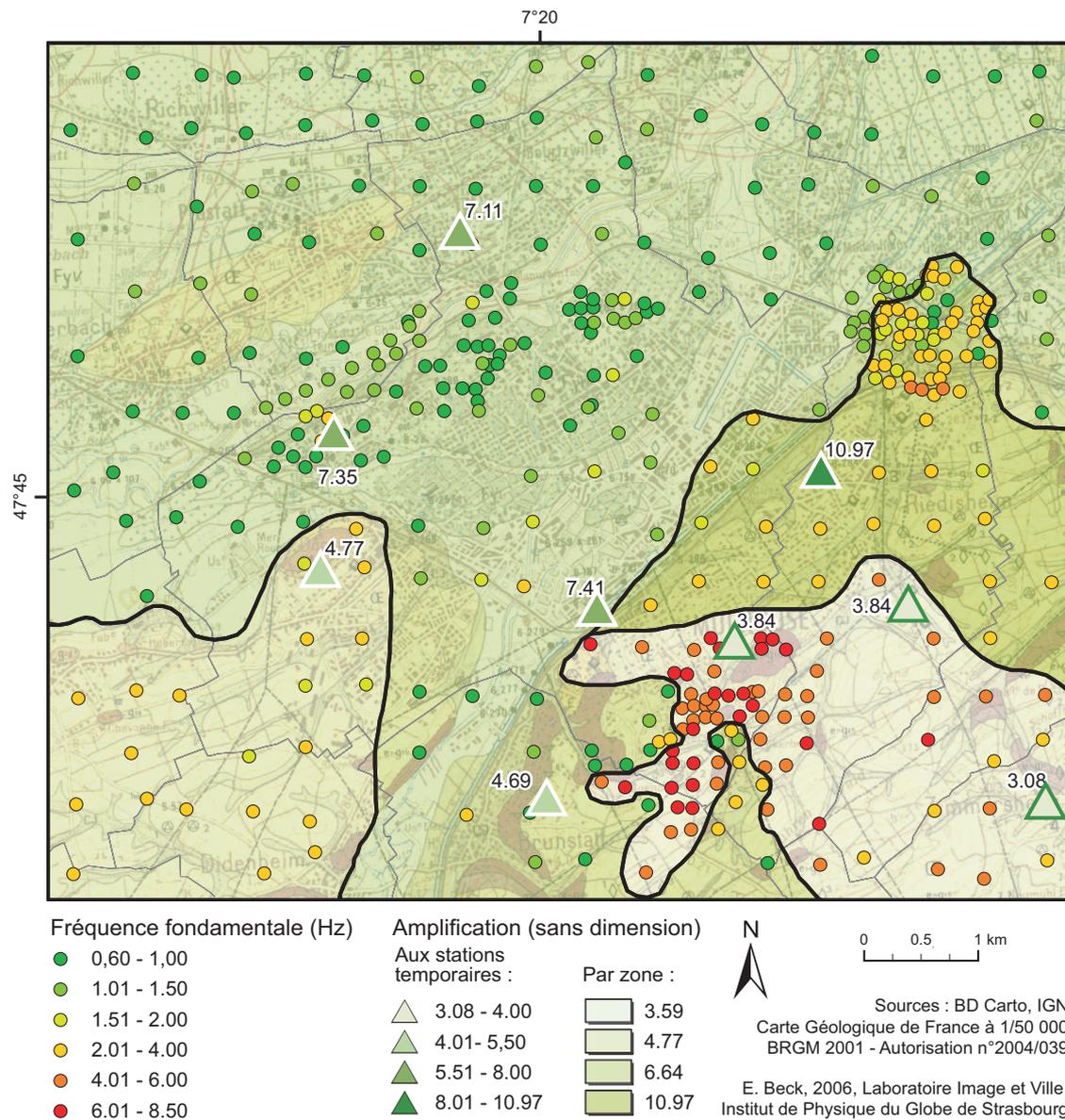


FIG. 3.24 – Partition de l'espace en zones homogènes d'effets de site. La partition a été élaborée à partir de la répartition spatiale des valeurs de fréquence fondamentale (mesures de bruit) et de la géologie de surface.

Enfin, la quatrième zone, localisée dans l'est de la région étudiée, est comparable à la troisième en termes de valeurs de fréquence (entre 0.75 et 4.47 Hz ; moyenne : 2.35 Hz ; mode : 2.10 Hz), même si des valeurs dépassant 4 Hz ou inférieures à 1 Hz sont observées localement. En revanche, l'amplification déterminée à la station RI2 est bien supérieure (10.97). Cette valeur d'amplification semble aberrante par rapport aux amplifications rencontrées dans le reste de la région d'étude. Sans indiquer de valeur numérique précise, nous retiendrons que l'amplification y semble plus élevée. Cette zone correspond à l'extrémité nord du horst de Mulhouse, composé de formations tertiaires recouvertes par des plaquages de loess.

Nous estimons que le nombre réduit de stations localisées dans chaque zone (par exemple, une seule station pour la quatrième zone) ne permet pas de considérer de manière absolue l'amplification que nous avons attribuée à chacune d'entre elles. Ainsi, nous leur affectons un niveau d'amplification plus ou moins élevé, allant de 1 à 4 : première zone : niveau 1 ; deuxième zone : niveau 2 ; troisième zone : niveau 3 ; quatrième zone : niveau 4. Ces chiffres sont sans dimension et n'ont pas de sens numérique ; ils indiquent uniquement que, par exemple, l'amplification "moyenne" dans la zone 2 (de niveau 2) est supérieure à celle de la zone 1 (de niveau 1).

Dans le cadre du programme de recherche SAFE, le BRGM a établi un microzonage sismique de niveau A¹⁸ à partir de forages, de données géotechniques et topographiques [Marcot et Arnal, 2004]. De même, dans le cadre du programme Interreg III, un microzonage a été réalisé d'après la classification des sols des Eurocodes 8¹⁹ [Roullé *et al.*, 2006]. Nous aurions pu utiliser ces deux zonages pour spatialiser l'amplification des ondes, mais nous avons décidé de rester cohérent et nous appuyer sur nos mesures de bruit et de séismes. Par ailleurs, bien qu'il existe des normes européennes, chaque pays est en mesure de les adapter à ses propres caractéristiques. Ainsi, les spectres de réponses des classes de sol définies par les Eurocodes 8 ne sont pas nécessairement les mêmes d'un pays à un autre. Ces spectres n'ont pas encore été validés par le législateur français ; les coefficients d'amplification de chaque type de sol ne sont pas encore connus.

En résumé, les mesures des effets de site permettent d'aboutir à deux ensembles de données : 1) une carte des fréquences fondamentales spatialisées, ce qui permettra d'évaluer le potentiel des bâtiments à entrer en résonance par une comparaison des fréquences estimées au site et celles calculées pour chaque ensemble de bâtiments mitoyens ; 2) une partition de l'espace, établie à partir des fréquences fondamentales et de la géologie de surface, où chaque secteur est affecté d'une valeur d'amplification. Cette partition sera intégrée dans la simulation des effets d'un séisme.

¹⁸Les microzonages sismiques (zonages sismiques à l'échelle d'une commune ou d'une agglomération, prenant en compte les effets de site et les effets induits) sont classés en trois niveaux de précision et de complexité croissantes, A, B et C ; A correspond au niveau le moins complexe. L'échelle, les données nécessaires, le séisme de référence et le niveau d'investigation varient : par exemple, un microzonage de niveau A sera réalisé au 1/25 000 avec une précision hectométrique à partir de données existantes et du séisme de référence indiqué par la réglementation en vigueur (zonage sismique et accélérations nominales). A l'opposé, un microzonage de niveau C sera réalisé à l'échelle du 1/5 000 au 1/10 000 et nécessitera des investigations complémentaires, la définition du séisme de référence et des calculs de spectres au rocher. Le choix du niveau de microzonage dépend de la zone dans laquelle se trouve l'agglomération (par rapport au zonage sismique français) : un niveau C est préconisé pour les agglomérations importantes situées en zone II ou III, alors qu'un niveau A suffit aux agglomérations importantes situées en zone Ia.

¹⁹Eurocodes : normes européennes de conception et de dimensionnement des bâtiments. Les Eurocodes 8 concernent plus particulièrement la conception et le dimensionnement des structures pour leur résistance aux séismes.

3.2.1.2 Simulation des effets d'un séisme de magnitude 6.0

La simulation des effets d'un séisme, à savoir l'estimation d'une accélération du sol maximale (PGA) selon un scénario déterminé, s'appuie sur l'analyse de l'aléa sismique local ou, en d'autres termes, sur l'étude de la sismicité historique et instrumentale dans le contexte tectonique local (failles actives) et sur l'évaluation des effets de site.

Dans notre cas, nous avons souhaité prendre en compte un scénario majorant afin d'identifier les éventuels dysfonctionnements. Il s'agit donc d'une approche déterministe, basée sur l'étude du séisme maximal historiquement vraisemblable. Dans la région de Mulhouse, le SMHV correspond au tremblement de terre de Bâle, qui s'est produit il y a tout juste 650 ans, le 18 octobre 1356.

Son intensité a été évaluée à IX-X [Meghraoui *et al.*, 2001], ce qui correspond à une magnitude $M_W = 6.0-6.5$. Une telle magnitude peut sembler élevée compte tenu de la sismicité actuelle, mais ce scénario reste tout à fait possible étant donné la sismicité historique de la région et le contexte tectonique tel qu'on en a connaissance aujourd'hui. Selon Th. Winter et B. Nivière [Nivière et Winter, 2000], au vu de l'épaisseur de la couche sismogène²⁰ dans le sud du Fossé Rhéna (10 à 12 km ; Bonjer, 1997) et de la longueur des failles d'Istein, d'Allschwil, d'Illfurth et de la flexure de la vallée de Rhin (fig. 3.25), comprise entre 10 et 25 km, des séismes de magnitude 6.0 à 6.5 [Wells et Coppersmith, 1994] sont en mesure de se produire dans le sud du Fossé Rhéna.

La localisation et les caractéristiques des failles actives, notamment leur longueur, ne sont pas connues dans leur totalité. Parmi les failles connues dans le sud du Fossé Rhéna, nous avons retenu celle d'Illfurth, localisée sur la commune d'Illfurth. Il s'agit d'une faille normale orientée SSE-NNW. Notre choix s'est porté sur cette faille car elle est proche de la ville de Mulhouse et permet de simuler un scénario pénalisant. L'épicentre du séisme est donc localisé à une dizaine de kilomètres au sud-ouest du centre de Mulhouse.

L'objectif étant de tenir compte du contexte tectonique local et de la localisation des différentes failles susceptibles de générer un séisme de magnitude élevée, un second scénario a été retenu, celui d'un séisme de magnitude 6.0 dont l'épicentre est localisé sur la faille d'Allschwil, à proximité de la ville de Bâle.

Dans les deux cas, nous avons opté pour une source ponctuelle (champ lointain), bien qu'une source étendue sur l'ensemble de la faille (champ proche) soit susceptible de générer des tremblements de terre de magnitude égale à 6 et de provoquer des accélérations élevées.

La loi d'atténuation retenue est celle calculée par Ambraseys *et al.* [Ambraseys *et al.*, 1996] (cf. § 2.1.3). Les accélérations obtenues après application de la loi d'atténuation ne prennent pas en compte les effets de site.

²⁰La couche sismogène est la couche fragile de la croûte supérieure où peuvent se produire des séismes.

Dans le cas du premier scénario (fig. 3.26), les valeurs d'accélération atteintes sont comprises entre 0.11 et 0.25 g dans l'agglomération, ce qui est élevé, car un bâtiment commence à ressentir les effets des ondes sismiques à des accélérations supérieures à 0.1 g. Une accélération de 0.1 g est généralement considérée comme la limite de sécurité pour les bâtiments [Madariaga et Perrier, 1991].

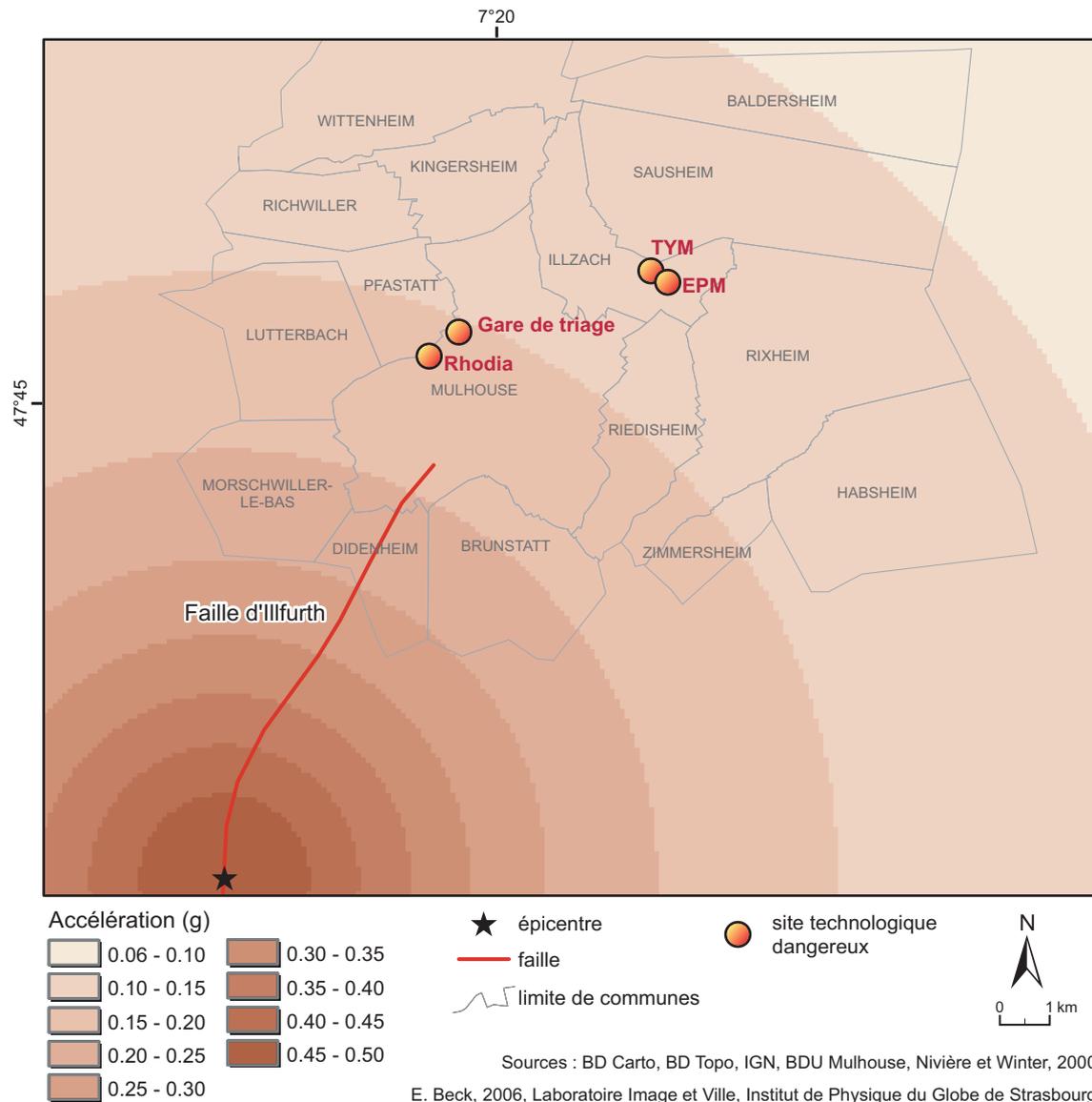


FIG. 3.26 – Simulation des effets d'un séisme : accélérations attendues pour un séisme de magnitude 6.0 dont l'épicentre est localisé sur la faille d'Illfurth. La loi d'atténuation employée est celle de N.N. Ambraseys et al. [Ambraseys et al., 1996]. Les accélérations maximales atteintes dans la région mulhousienne sont comprises entre 0.11 et 0.25 g.

Selon le second scénario, l'agglomération de Bâle devrait supporter des accélérations proches de 0.38 g, alors que, dans la région de Mulhouse, localisée à 25 km de l'épicentre, les accélérations dépasseraient à peine 0.1 g dans le sud-est de la zone (0.06 à 0.11 g du nord-ouest au sud-est de la région d'étude ; fig. 3.27). Le second scénario serait bien moins pénalisant pour l'agglomération de Mulhouse que le premier.

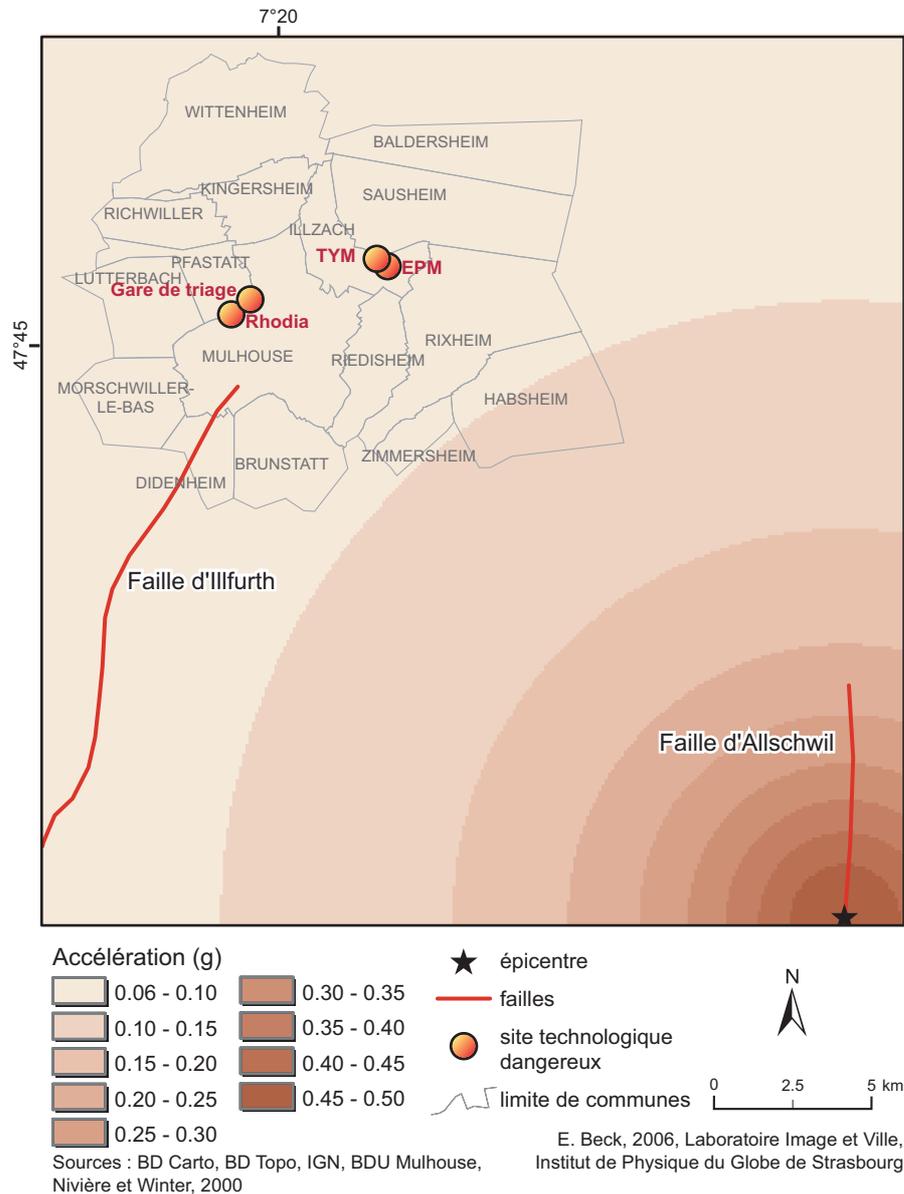


FIG. 3.27 – Simulation des effets d'un séisme : accélérations attendues pour un séisme de magnitude 6.0 dont l'épicentre est localisé sur la faille d'Allschwil. La loi d'atténuation employée est celle de N.N. Ambraseys et al. [Ambraseys et al., 1996]. Les accélérations maximales atteintes dans la région mulhousienne sont comprises entre 0.06 et 0.11 g.

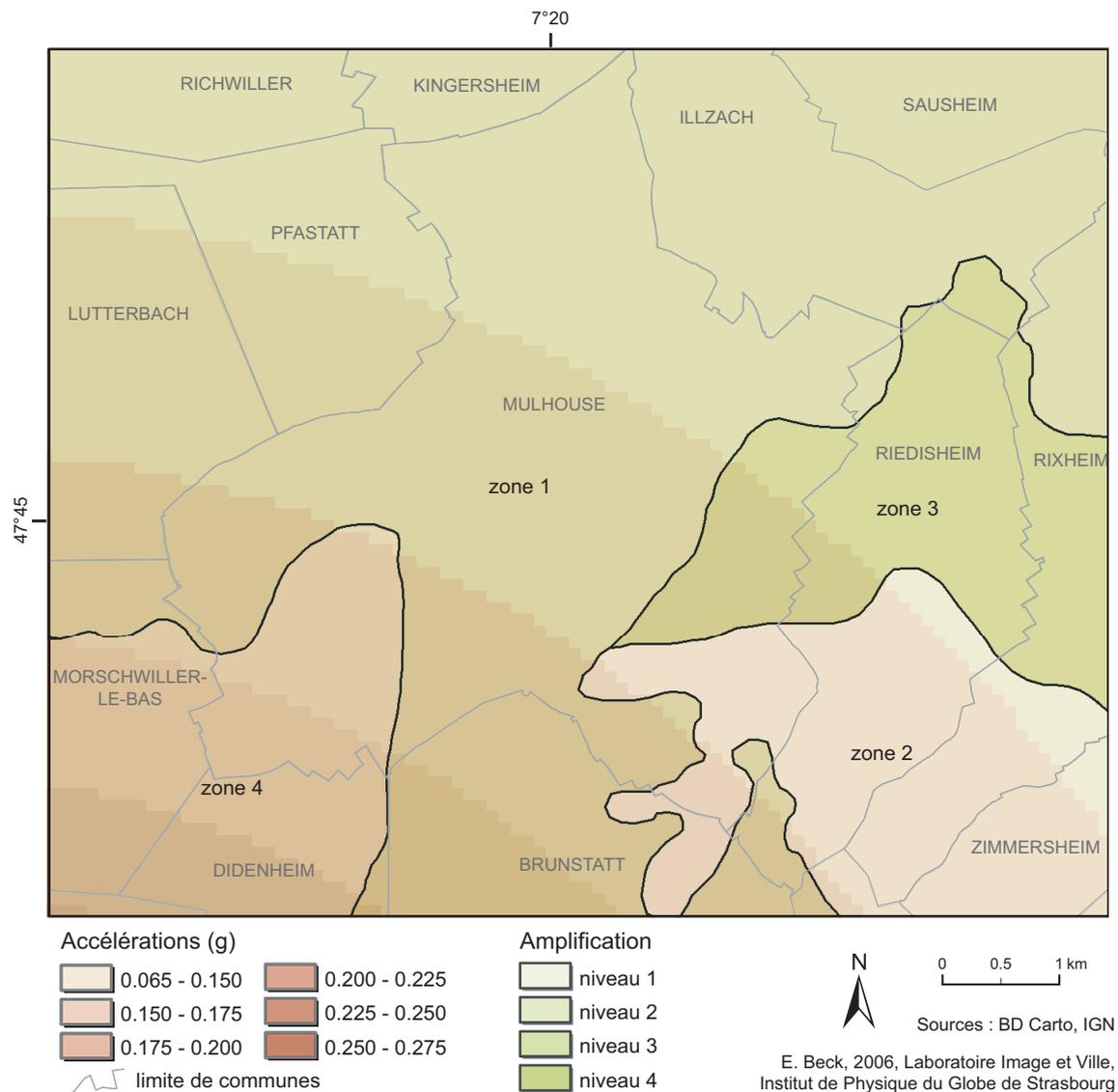


FIG. 3.28 – Accélérations attendues selon le premier scénario et zones d'effets de site homogènes. La loi d'atténuation employée est celle de N.N. Ambraseys et al. [Ambraseys et al., 1996]. Les zones homogènes d'effets de site ont été déterminées à partir de la variabilité spatiale des fréquences fondamentales et de la géologie de surface.

Les différentes valeurs d'accélération obtenues pointent la nécessité de connaître la localisation et la longueur des failles actives dans l'élaboration de scénarios réalistes, étant donné les variations d'accélération que l'on obtient d'un scénario à un autre.

L'intégration des effets de site dans le scénario est une étape délicate. Certaines lois d'atténuation intègrent un paramètre égal à 0 ou 1 et permettant d'intégrer d'une manière assez simple l'influence d'un sol mou sur les accélérations résultantes. Dans notre cas, nous allons tirer profit des mesures réalisées et de la partition de l'espace en des "zones homogènes" d'effets de site, en considérant les différences d'amplification d'une zone à une autre de manière relative et non de manière absolue (fig. 3.28). Il n'est pas possible de multiplier simplement chaque valeur d'accélération calculée à partir de la loi par la valeur d'amplification moyenne attribuée à chaque zone homogène, c'est pourquoi nous procéderons à une analyse visuelle de la superposition des valeurs d'accélération et de zones d'effets de site.

A l'analyse du premier scénario (fig. 3.28), on observe que le sud-ouest de la zone est caractérisé par les accélérations les plus élevées (entre 0.20 et 0.25 g) et par une amplification de niveau 2 : les accélérations seront ainsi amplifiées principalement à proximité de la valeur de fréquence fondamentale. La ville de Mulhouse et les communes avoisinantes du nord et de l'ouest sont principalement caractérisées par des amplifications de niveau 3 et des valeurs d'accélérations comprises entre 0.10 et 0.25. Enfin, l'est de la région oppose une zone sud où les accélérations attendues atteignent des valeurs maximales de 0.22 g pour une amplification de niveau 1 et un secteur localisé au nord avec des amplifications de niveau 4 et des accélérations autour de 0.16 g.

Il nous semble important de présenter succinctement les résultats du programme européen SAFE²¹ relatifs à la ville de Mulhouse [Marcot et Arnal, 2004 ; BRGM, 2004].

Dans le cadre de ce projet, le BRGM a simulé un séisme d'une magnitude $M_W = 5.3$ sur la faille d'Illfurth, avec un épicentre localisé à 10 km de Mulhouse, et à partir de la loi d'atténuation de Sadigh *et al.* [Sadigh *et al.*, 1997]. L'accélération calculée au centre de la ville de Mulhouse est égale à 0.14 g. L'élaboration d'un microzonage sismique de niveau A à partir d'une analyse des forages de la BSS, de la carte géologique et des rapports du BRGM sur la région a permis de prendre en compte les effets de site dans cette simulation. Le microzonage a été élaboré conformément à la classification des sols préconisée par la réglementation sismique française en vigueur (PS-92). Les accélérations calculées ont été multipliées par un coefficient compris entre 0.00 et 0.76 selon la classe de sol. Au final, une carte des intensités générées par le séisme retenu pour le scénario a été obtenue. Une intensité minimale de VI-VII est estimée à l'est de Rixheim et une intensité maximale de VIII-IX est atteinte dans le quartier des Coteaux.

Parallèlement, la vulnérabilité du bâti a été caractérisée selon la typologie de l'EMS-98, principalement sur la base de l'âge et du type de bâtiment (collectif-individuel) [Simonet et Marcot, 2004].

L'évaluation des dommages sur les bâtiments a été réalisée par la combinaison des données d'intensité et de vulnérabilité du bâti (classe A, B, C, D, E ou F ; cf. annexe 3) à l'aide d'une fonction d'impact.

Les résultats observés dans le cadre de ce scénario sont nécessairement différents des résultats obtenus dans le cadre de notre travail, étant donné que les paramètres choisis (notamment la définition du scénario) et les méthodes sont différentes (loi d'atténuation, localisation de l'épicentre, prise en compte des effets de site, caractérisation de la vulnérabilité, etc.). A partir de ce scénario, le BRGM a calculé le nombre de victimes (4-45 morts), de sans-abri (1 000-7 000) selon différents scénarios de séisme. Les résultats obtenus nous semblent faire l'objet de grandes incertitudes car les hypothèses sur les conséquences de ce séisme sur la population sont très fortes et posent un certain nombre de questions : comment quantifier la population active ? Comment répartir de manière réaliste les habitants recensés par l'INSEE dans les différents bâtiments endommagés ? Comment prendre en compte la population qui ne se trouve pas dans un bâtiment ?

²¹SAFE : Slow Active Faults in Europe (2001-2004), 5^e PCRD ; Coordinateur scientifique : M. Sébrier, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.

3.2.2 Aléa technologique dans l'agglomération mulhousienne

3.2.2.1 Exposition cumulée

En se fondant sur le paragraphe 2.2.1, deux types d'exposition peuvent être présentées : cumul quantitatif (somme des enveloppes superposées) et cumul qualitatif (type d'effets).

Dans le premier cas, l'aléa technologique de l'agglomération mulhousienne correspond à 31 scénarios d'accidents différents, répartis sur les quatre sites dangereux (Rhodia, gare du Nord, TYM, EPM). Ces scénarios sont extraits des données fournies par les entreprises dans les études de danger. La carte 3.29 présente l'extension spatiale (ou enveloppe) de ces divers scénarios. Les principales caractéristiques de chacun d'entre eux (identifiant, rayon de l'enveloppe, type d'effets redoutés, nom de l'entreprise) sont décrites en annexe 9. 18 scénarios sont susceptibles de se produire sur le site de Rhodia, trois sur celui de la gare du Nord, un seul sur le site de TYM et neuf sur celui de EPM (annexe 9).

L'exposition cumulée est obtenue par la superposition des enveloppes des scénarios. Dans le cas de l'agglomération de Mulhouse, 14 enveloppes sont superposées en un même point (fig. 3.30), ce qui signifie qu'un individu localisé en ce point est susceptible d'être exposé à 14 scénarios différents (tous types d'effets redoutés confondus). Ce maximum est atteint dans l'enceinte de Rhodia (un maximum de 10 enveloppes superposées est observé sur le site des EPM), comme l'indiquent les deux agrandissements de la figure 3.30, centrés sur les secteurs Rhodia-gare du Nord et EPM-TYM. L'explication est donnée par la taille réduite de certaines enveloppes, dont le rayon est égal à 1 m pour le plus petit (cf. annexe 9). Comme l'indiquent les extraits des études de danger, les effets de ces scénarios ne sont pas censés dépasser l'emprise des sites dangereux. Si on ne considère que l'aléa hors-site, jusqu'à six superpositions extérieures au site de l'entreprise peuvent être observées dans le secteur Rhodia-Gare. Ainsi, le danger est plus grand (en tous cas en termes de cumul quantitatif) dans le secteur Rhodia-gare du Nord. Comme on le constate également sur la carte 3.30, le secteur Est de la région d'étude est relativement épargné par l'aléa technologique.

La représentation du cumul quantitatif peut être plus précise et ne porter que sur un seul type d'effets redoutés. Par exemple, sur la figure 3.31, nous avons représenté l'exposition cumulée à l'effet toxique. Le nombre maximal d'enveloppes superposées est alors de huit dont quatre à l'extérieur des emprises des sites dangereux.

Dans le second cas, la carte 3.32 représente le cumul qualitatif, c'est-à-dire les combinaisons d'effets redoutés en chaque point de l'espace. Ainsi, certains secteurs sont exposés aux trois types d'effets redoutés (0.2 km² au total), d'autres à deux effets différents (thermique et surpression : 0.05 km² ; toxique et thermique : 4.1 km²) ; enfin, d'autres sont exposés à un seul type d'effet (thermique, pour une surface de 1.1 km² ou toxique pour une surface de 62 km²).

Cette carte montre que la plus grande partie de la zone d'étude n'est concernée que par un type seul d'effet, le toxique, en raison de la taille importante de l'enveloppe du scénario toxique majorant de la gare du Nord (rayon de 4 km autour de l'emprise de la gare de triage ; le scénario correspond à un accident impliquant un wagon de chlore).

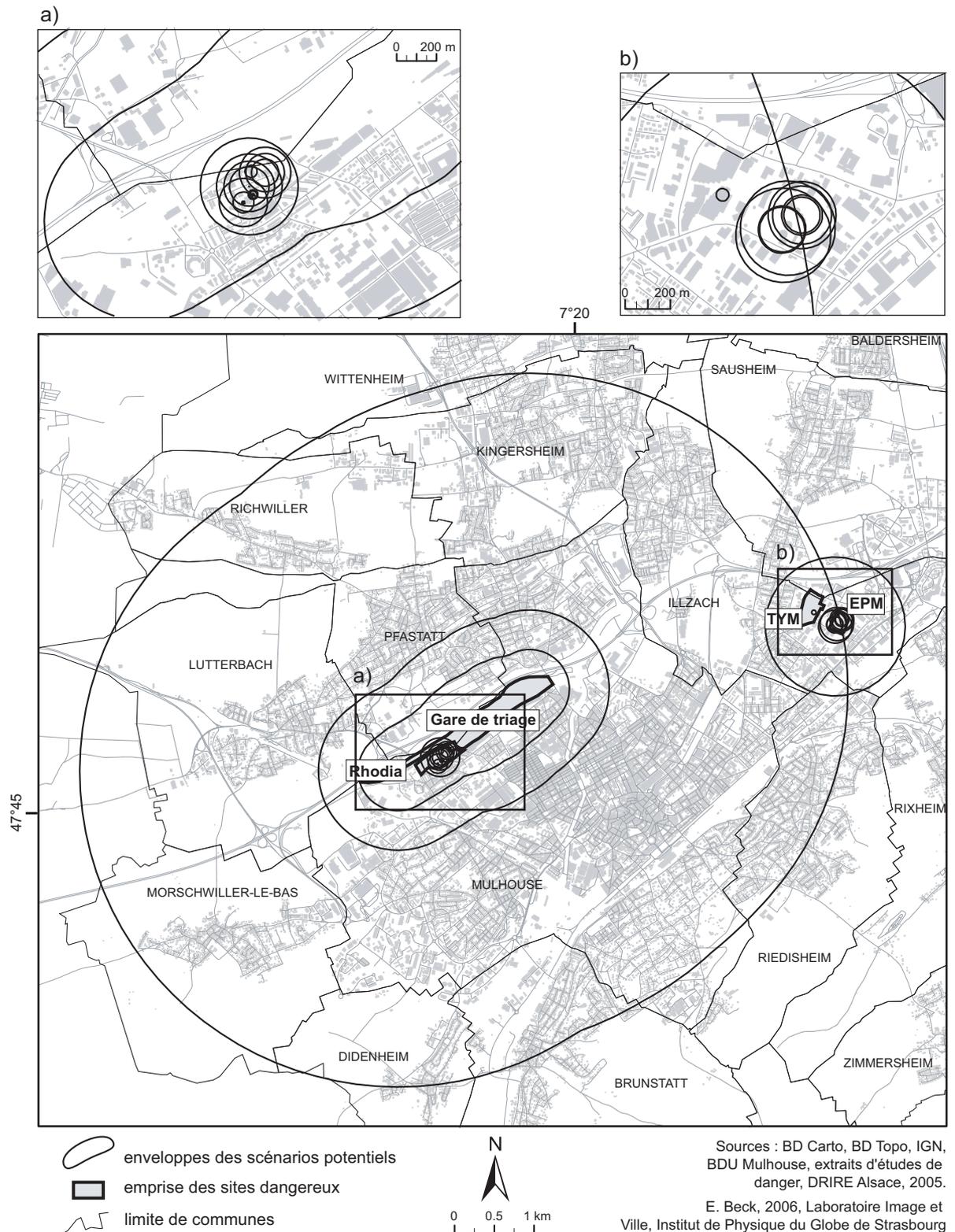
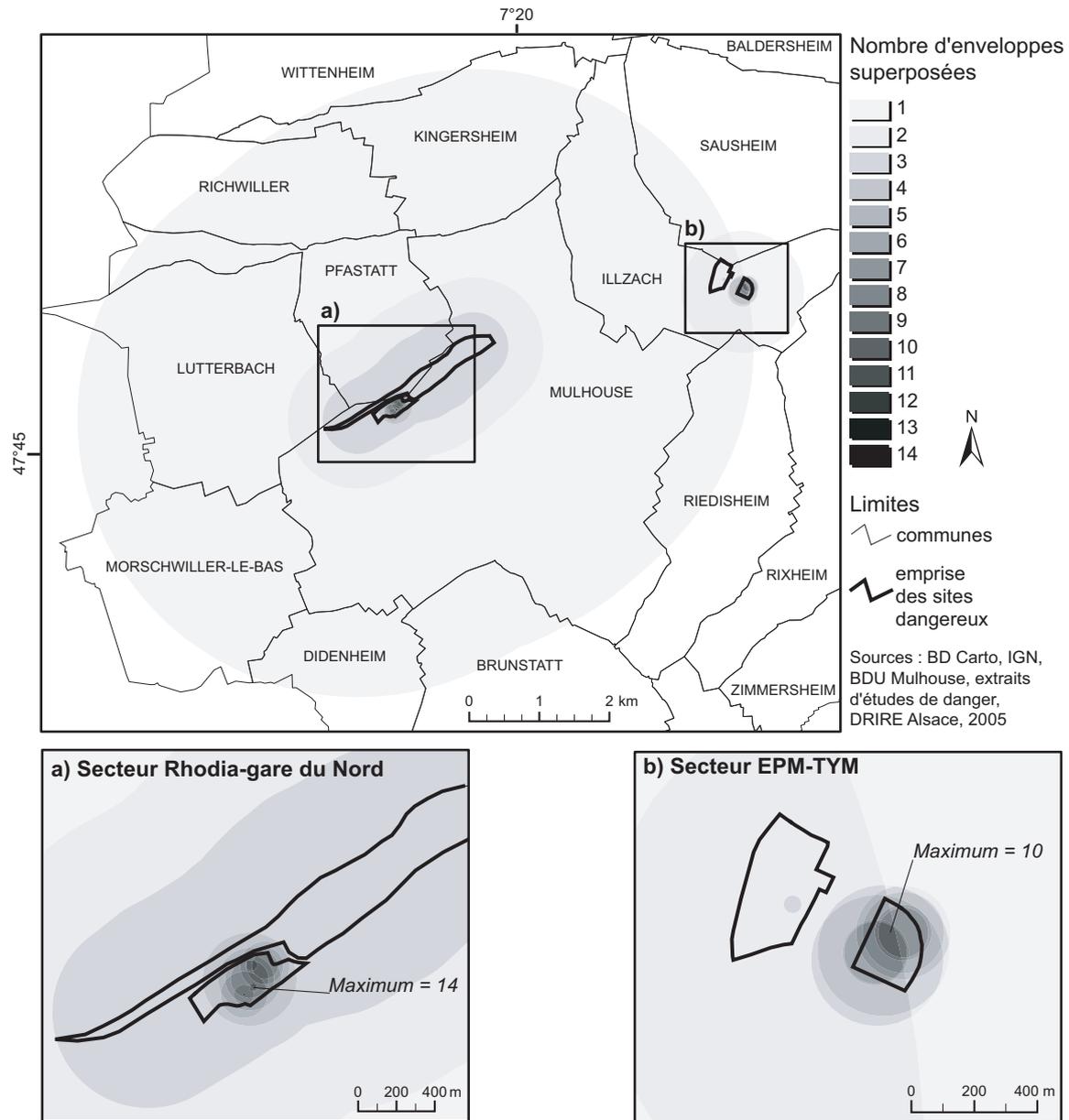


FIG. 3.29 – Extension spatiale (enveloppes) des scénarios d'accidents redoutés dans l'agglomération mulhousienne. On recense 31 scénarios d'accidents différents, répartis sur les quatre sites dangereux de l'agglomération de Mulhouse. L'enveloppe la plus grande correspond à un scénario dont le point source est l'emprise ferroviaire de la gare de triage (gare du Nord) et dont le rayon est égal à 4 km.



E. Beck, 2006, Laboratoire Image et Ville, Institut de Physique du Globe de Strasbourg

FIG. 3.30 – Exposition cumulée : nombre d'enveloppes superposées (tous effets confondus). Jusqu'à 14 enveloppes sont superposées en un point, mais ce nombre maximal n'est rencontré que dans l'enceinte des sites industriels : les agrandissements centrés sur les deux secteurs montrent bien que la plupart des enveloppes ne dépassent pas les limites des sites. Le secteur de Rhodia-gare du Nord est caractérisé par un aléa plus élevé (14 enveloppes superposées contre 10 pour le secteur EPM-TYM). A l'extérieur des sites, on observe jusqu'à six enveloppes superposées.

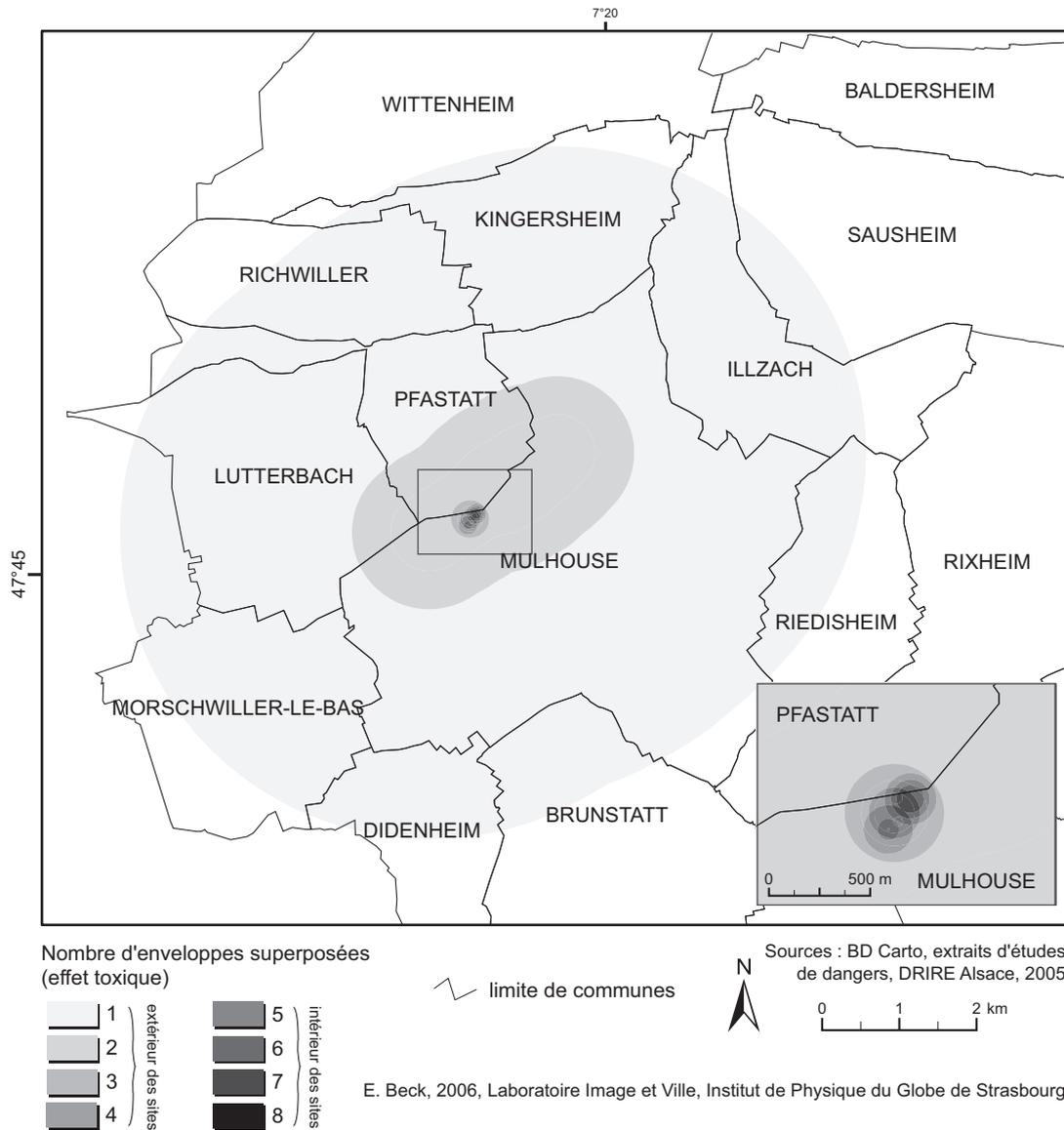


FIG. 3.31 – Exposition cumulée à l'effet toxique. Dans le cas de l'effet redouté "toxique", le nombre maximal d'enveloppes superposées est égal à huit (quatre si on ne considère que l'extérieur des emprises des sites dangereux).

L'aléa technologique prend en compte uniquement le cumul quantitatif et est représenté par quatre classes, suivant le nombre d'enveloppes se superposant. Etant donné que nous nous intéressons principalement au devenir des populations exposées à l'extérieur des sites industriels, nous avons regroupé en une classe d'aléa élevé les superpositions confinées à l'intérieur de ceux-ci (sept enveloppes superposées et plus). On propose l'échelle d'aléa technologique suivante :

- aléa faible : 1 ou 2 enveloppes superposées ;
- aléa faible à moyen : 3 ou 4 enveloppes superposées ;
- aléa moyen à élevé : 5 ou 6 enveloppes superposées ;
- aléa élevé : 7 à 14 enveloppes superposées.

On obtient ainsi une carte d'aléa technologique hiérarchisé en quatre niveaux (fig. 3.33). L'analyse de la répartition spatiale des PPI, confortée par celle de l'exposition cumulée et de la carte d'aléa, permet d'identifier deux secteurs d'aléa technologique élevé : il s'agit du secteur Rhodia-gare du Nord, dans la partie ouest de la ville de Mulhouse et du secteur EPM-TYM, au nord-est de Mulhouse, sur la commune d'Illzach. La majorité de la zone d'étude est exposée à un aléa faible (une ou deux enveloppes superposées), notamment en raison de l'extension du scénario n°31 de la gare de triage. Rappelons que la notion d'aléa faible n'est basée ici que sur le cumul quantitatif des enveloppes et ne prend pas en compte la gravité des effets redoutés.

3.2.2.2 Prise en compte d'un gradient des effets avec la distance au point source

Le gradient des effets avec la distance au point source permet d'avoir une idée plus fine de l'exposition réelle d'un individu ou d'un bâtiment à l'aléa technologique (cf. équ. 2.4 et § 2.2.3 : l'intensité diminue avec la distance au carré au point source). Cette démarche ne pouvant cependant considérer plusieurs types d'effets simultanément, il est nécessaire de prendre en considération d'un côté les effets thermiques et de l'autre les effets de surpression. Rappelons que nous ne considérons pas l'effet toxique pour la prise en compte d'un tel gradient, étant donné la complexité des paramètres qui entrent en jeu (cf. § 2.2.3) : ainsi, les scénarios 1 à 7, 13, 30 et 31 ne sont pas pris en compte. De même, les scénarios dont la distance d'effets est inférieure à 10 m sont écartés (scénarios 8, 9, 10, 14 et 16).

Pour les 16 scénarios restant, l'intensité des effets redoutés au point source de chaque scénario a été déterminée proportionnellement au rayon de chaque enveloppe, en attribuant une valeur de 1 au rayon le plus grand. Dans le cas de l'effet thermique, le rayon le plus grand correspond au scénario 20 (880 m). Dans le cas de l'effet de surpression, le rayon le plus grand correspond aux scénarios 27 et 28 (210 m). Les intensités au point source de l'ensemble des scénarios pris en compte dans cette étape sont indiquées dans le tableau 3.5.

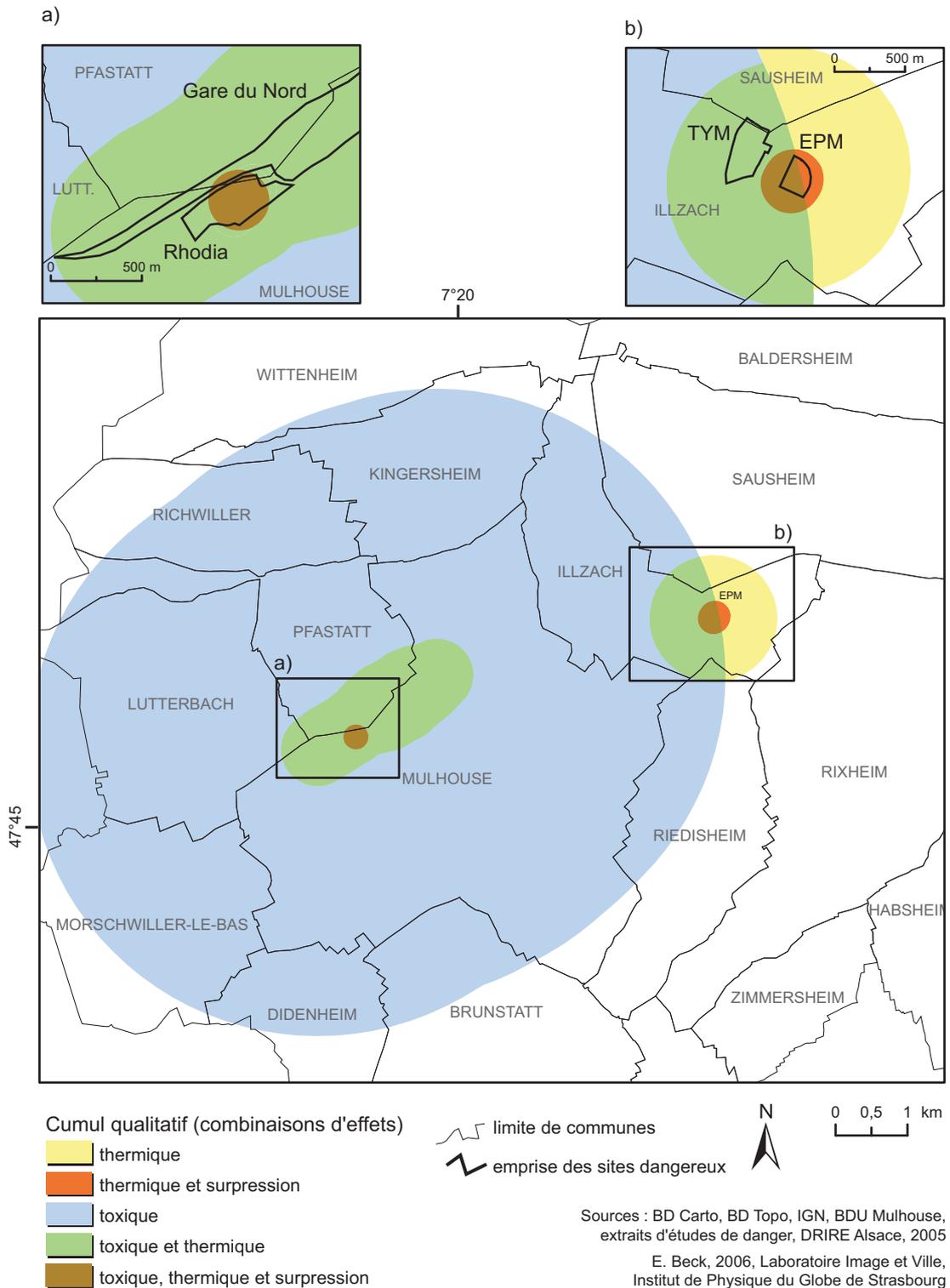


FIG. 3.32 – Cumul qualitatif : différentes combinaisons d'effets. L'effet toxique domine, en raison des dimensions importantes de l'enveloppe du scénario n° 31 (annexe 8), qui correspond à un accident impliquant un wagon de chlore sur le site de la gare de triage et dont le rayon est de 4 km.

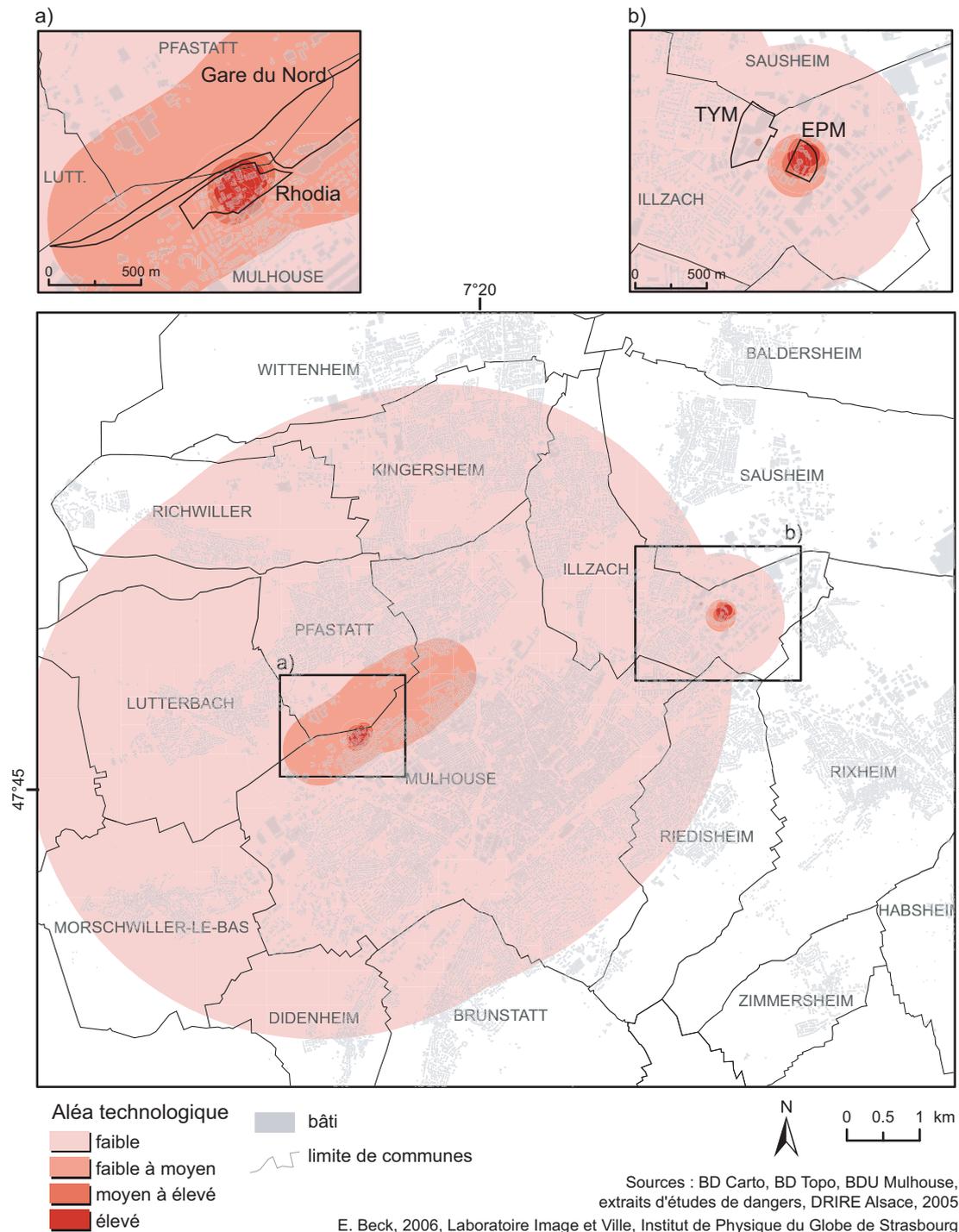


FIG. 3.33 – Carte d'aléa technologique. Deux secteurs d'aléa technologique élevé apparaissent nettement : ils correspondent aux deux secteurs Rhodia-gare du Nord et EPM-TYM. La plus grande partie de la région étudiée est exposée à un aléa faible (une ou deux enveloppes superposées).

Effet thermique

ID du scénario	Distance (m)	Intensité au point source	Entreprise
11	18	0.02	Rhodia
12	24	0.03	Rhodia
19	28	0.03	TYM
23	80	0.09	EPM
21	90	0.10	EPM
25	100	0.11	EPM
15	100	0.11	Rhodia
26	105	0.12	EPM
24	130	0.15	EPM
22	150	0.17	EPM
29	500	0.57	Gare du Nord
20	880	1.00	EPM

Effet surpression

ID du scénario	Distance (m)	Intensité au point source	Entreprise
18	31	0.15	Rhodia
17	165	0.79	Rhodia
27	210	1.00	EPM
28	210	1.00	EPM

TAB. 3.5 – Intensité au point source de chaque scénario (effets thermique, à gauche, et de surpression, à droite). L'intensité des effets redoutés au point source de chaque scénario a été déterminée proportionnellement au rayon de chaque enveloppe, en attribuant une valeur de 1 au rayon le plus grand.

Les variations d'intensité au point source selon le rayon des différentes enveloppes sont très importantes puisque, dans le cas de l'effet thermique par exemple, on observe une intensité au point source minimale de 0.02 (tab. 3.5).

Sachant que cette intensité diminue selon l'inverse de la distance au carré (cf. équ. 2.4 et § 2.2.3), les effets décroissent très rapidement dès que l'on s'éloigne du point source. La carte 3.34 montre l'exemple de deux scénarios (27 et 28) de l'effet de surpression : à 50 m du centre du disque, l'intensité initiale (au point source) est divisée par 2 500 ! Les valeurs normalisées indiquées par la carte 3.34 n'ont pas de dimension mais elles permettent de figurer spatialement la décroissance des effets avec la distance au point source. Cela fournit des renseignements spatiaux utiles dans les deux types de scénarios : par exemple, autour d'EPM, il n'y a pas de logements dans un rayon de 400 m autour de l'entreprise, excepté des logements de fonction. Cependant, les EPM sont localisés à proximité de la zone industrielle et commerciale de l'Île Napoléon, où sont implantées 151 entreprises et où travaillent 4 354 personnes durant la journée ²². Les EPM avoisinent également des zones hôtelières, un lycée fréquenté par 887 personnes, deux groupes scolaires (472 personnes) et un collèges (458 personnes).

²²Source : PPI des EPM.

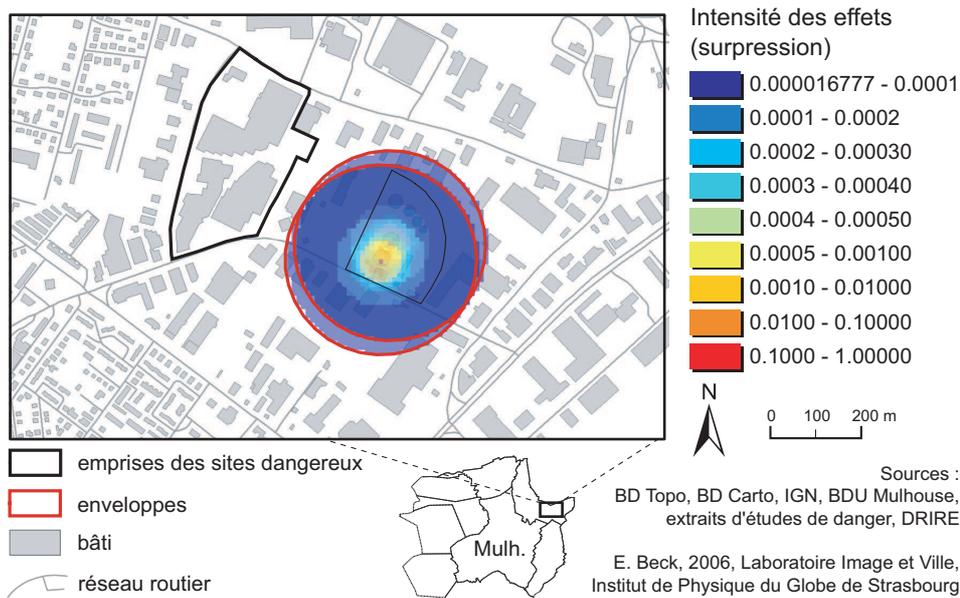


FIG. 3.34 – Exemple de prise en compte de la distance pour deux scénarios à effets redoutés de type “surpression”. La décroissance des effets avec la distance est très rapide : à 50 m, l'intensité au point source est divisée par 2 500 (0.0004 pour une intensité au point source égale à 1).

3.2.3 Conclusion de l'étude des aléas

L'étude des aléas a montré une répartition inégale de ceux-ci sur le territoire étudié. Concernant l'aléa sismique, nous avons pu constater qu'un séisme se produisant sur la faille d'Illfurth générerait des accélérations plus élevées dans le secteur sud-ouest de la zone (jusqu'à 0.25 g), alors que le sud-est serait davantage affecté si le séisme se produisait sur la faille d'Allschwil, avec des accélérations plus faibles (accélérations maximales de 0.11 g). L'étude des effets de site montre une bonne homogénéité spatiale des valeurs de fréquences fondamentales. En revanche, les facteurs d'amplification obtenus par la méthode de Nakamura sont caractérisés par une très importante variabilité spatiale, bien que la majorité des sites montrent des amplifications moyennes, autour de 3-4. Les zones d'effets de site homogènes, déterminées à partir des fréquences fondamentales de H/V de bruit et des amplifications estimées à partir de la méthode des fonctions récepteurs, montrent des différences d'amplification d'une zone à une autre : les effets de site les plus importants sont observés sur la commune de Riedisheim, dans la partie est de la zone d'étude. Quant à l'aléa technologique, une grande partie de la région d'étude est exposée à un niveau d'aléa faible (une ou deux enveloppes superposées) et à des effets redoutés de type “toxique” ; deux secteurs sont concernés par un aléa élevé, autour de Rhodia-gare du Nord (ouest de Mulhouse) et autour des établissements EPM-TYM (Illzach). L'atténuation des effets d'un accident technologique avec la distance au point source indique également une inégale répartition spatiale des intensités, puisque les effets décroissent très rapidement dès lors que l'on s'éloigne du point source.

Nous allons à présent étudier la vulnérabilité des éléments exposés (bâti et population).

3.2.4 Vulnérabilité

3.2.4.1 Vulnérabilité du bâti

La définition d'une vulnérabilité totale ²³ du bâti implique de connaître sa vulnérabilité physique aux tremblements de terre et sa vulnérabilité fonctionnelle (cf. § 2.3.4).

– Vulnérabilité physique aux tremblements de terre

La vulnérabilité physique des bâtiments a été évaluée à partir de leur hauteur et de la fréquence de résonance du site. La carte 3.35 indique tout d'abord la fréquence de résonance approximative des bâtiments de la ville de Mulhouse et des communes limitrophes ; ces fréquences ont été calculées à partir de la relation 2.8 (cf. § 2.3.1.2).

Etant donné que la fréquence de résonance des bâtiments est calculée à partir de la hauteur de bâtiment, on retrouve une corrélation forte entre la valeur de fréquence obtenue et le type de tissu urbain. Le centre ville de Mulhouse et le quartier des Coteaux (au sud-ouest) apparaissent nettement, puisqu'il s'agit des quartiers dont la hauteur moyenne est la plus élevée (valeurs de fréquence fondamentale de bâtiment inférieures à 1.70 Hz) : 667 bâtiments sont concernés (moins de 2 % des bâtiments). Les valeurs les plus élevées, correspondant aux bâtiments les plus bas, sont rencontrées dans les villages ou dans des quartiers résidentiels (Mer Rouge et Rebberg, respectivement dans le sud-ouest et le sud-est de Mulhouse). Les valeurs moyennes (entre 1.71 et 5 Hz) correspondent à des immeubles de taille moyenne (plus de deux étages). Ils sont situés principalement dans le centre ville de Mulhouse et des communes avoisinantes. Il s'agit de la catégorie la plus représentée (43 % du bâti).

Les fréquences fondamentales de bâti ont été estimées dans l'objectif de calculer la différence Δf_0 entre celle-ci et la fréquence fondamentale de site, supposée représenter le potentiel d'un bâtiment à entrer en résonance. Bien que Δf_0 caractérise un couple bâtiment/site, nous avons ramené les valeurs de Δf_0 à chaque ensemble de bâtiments mitoyens, étant donné que nous cherchons à estimer leur vulnérabilité. La différence entre la "fréquence du bâtiment" et la "fréquence de site" (Δf_0) est figurée par la carte 3.36. La vulnérabilité du bâti des communes de Mulhouse et Riedisheim (localisée à l'est) apparaît nettement : elles concentrent les vulnérabilités les plus élevées (62 % des bâtiments avec Δf_0 inférieure à 1 Hz sont localisés à Mulhouse, 21 % à Riedisheim). Sur la totalité des bâtiments, 12 % montrent une Δf_0 suffisamment faible (inférieure à 1 Hz) pour craindre qu'ils entrent en résonance en cas de séisme [Widmer *et al.*, 2003].

Parmi ces bâtiments plus vulnérables, on ne compte pas moins de 23 bâtiments à fonction médicale, quatre instances dirigeantes, trois bâtiments de services de secours et six bâtiments correspondant à un bâtiment source d'accident industriel. Ces résultats ne signifient pas qu'ils entreront effectivement en résonance si un séisme de magnitude élevée venait à se produire, étant donné l'incertitude des valeurs de fréquence fondamentale du bâtiment, mais qu'il sera cependant nécessaire de procéder à des calculs plus poussés pour connaître avec une meilleure précision le potentiel d'entrer en résonance de ces bâtiments.

²³Vulnérabilité totale : vulnérabilité synthétisant les vulnérabilités physique, fonctionnelle (hauteur et fonction principale) et la densité de population. La vulnérabilité totale est ramenée à l'échelle du bâtiment.

– **Vulnérabilité fonctionnelle**

La typologie proposée au paragraphe 2.3.2.4 peut être adoptée si l'ensemble des données était disponible, ce qui n'est pas notre cas. Notre principale difficulté réside dans la pauvreté de la table attributaire de la couche de bâti, puisque l'attribut "catégorie" ou "nature" de la BD Topo® de l'IGN est identifié pour à peine 4 235 bâtiments sur les 34 707 de la zone d'étude (soit 12 % des bâtiments). Mais il faut noter que les 88 % représentent essentiellement de l'habitat résidentiel, contrairement aux 12 % pour lesquels la fonction est connue. Néanmoins, cela implique une légère refonte de la typologie et l'ajout d'une modalité "non définie" pour l'attribut "fonction". L'exhaustivité de la table attributaire de la couche "bâti" a pu être également améliorée, grâce à d'autres informations (Pages Jaunes, connaissance du terrain, carte topographique 1/25 000, plans des communes, autres couches de la BD Topo®). Des regroupements sémantiques ont été opérés. Par exemple, les modalités "mairie" et "sous-préfecture" ont été dotées de la fonction "instance dirigeante" et les "église", "chapelle" et "bâtiment religieux divers" de la fonction "religieuse".

L'identification des IGH implique de connaître la fonction, puisque la hauteur retenue est différente selon qu'il s'agit d'un bâtiment à vocation résidentielle ou non. Le fait que l'attribut "fonction" soit très peu renseigné a constitué un obstacle. Ainsi, nous avons attribué aux immeubles dont nous connaissions la fonction une modalité "oui" à l'attribut IGH dès qu'ils dépassaient les 50 m de hauteur pour les bâtiments résidentiels et 28 m pour les autres. Pour les immeubles dont la nature était non définie, le cas le plus pénalisant a été choisi : l'attribut "IGH" a été affecté aux bâtiments d'une hauteur supérieure à 28 m, que leur fonction soit en réalité résidentielle ou non.

La population sensible a également été recensée : il s'agit des bâtiments à fonction éducative, médicale et carcérale ²⁴ ; ces différents établissements ont été dotés d'une modalité "population sensible".

Concernant les ERP, les données se présentaient sous la forme d'un tableau indiquant leur nom, leur adresse, leur capacité d'accueil. Le recours aux Pages Jaunes ne permet pas d'identifier avec précision les bâtiments correspondant à un ERP. Des observations de terrain auraient permis d'aboutir à une information plus précise, si l'échelle d'étude n'avait pas été l'agglomération et si la région n'avait pas compté 435 établissements de catégorie 1, 2 ou 3 (cf. § 2.3.2.2 et annexe 5). C'est pourquoi, plutôt que d'ajouter un attribut dans la couche "bâtiment", nous avons créé une couche supplémentaire et localisé les ERP sous la forme d'objets ponctuels ²⁵.

Les bâtiments Seveso ont été localisés à partir des plans de masse et des informations cartographiques fournies par les extraits des études de danger. Il n'existe pas d'établissement classé "Seveso seuil bas" dans la région d'étude, c'est pourquoi seule la modalité "seuil haut" a été conservée.

²⁴La BD Topo® ne fournit pas de données sur les maisons de retraite, c'est pourquoi nous n'avons pas pu en tenir compte dans notre application à l'agglomération de Mulhouse.

²⁵Les plans des Pages Jaunes ne permettent pas de distinguer avec précision la localisation d'un bâtiment : en général, la localisation du bâtiment correspondant à l'adresse recherchée est indiquée par un symbole ponctuel. Cette localisation est par ailleurs approximative. Pour certains ERP, nous avons couplé les données de la BD Topo® avec les informations fournies par les Pages Jaunes pour les localiser avec le maximum de précision possible (par exemple, une église est indiquée dans la BD Topo®, nous pouvons savoir avec précision de quel bâtiment il s'agit). Pour les autres, nous avons dû nous contenter de la précision toute relative des Pages Jaunes.

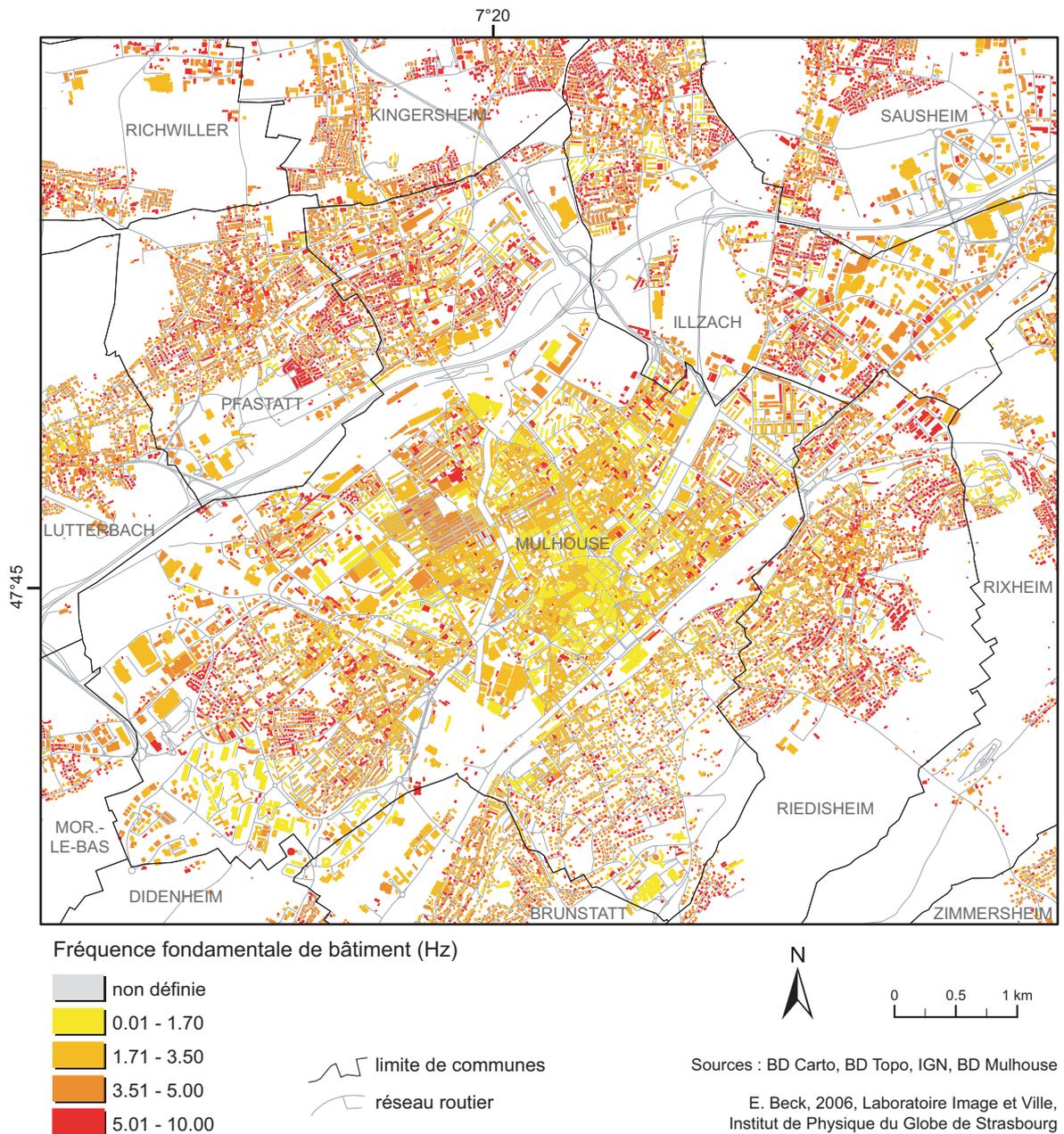


FIG. 3.35 – Estimation de la fréquence de résonance des bâtiments. Les fréquences ont été calculées à partir de la relation 2.8 (cf. § 2.3.1.2) sur la base des hypothèses suivantes : les groupes de bâtiments mitoyens ont un comportement d'ensemble ; la fréquence de résonance dépend principalement de la hauteur moyenne des bâtiments.

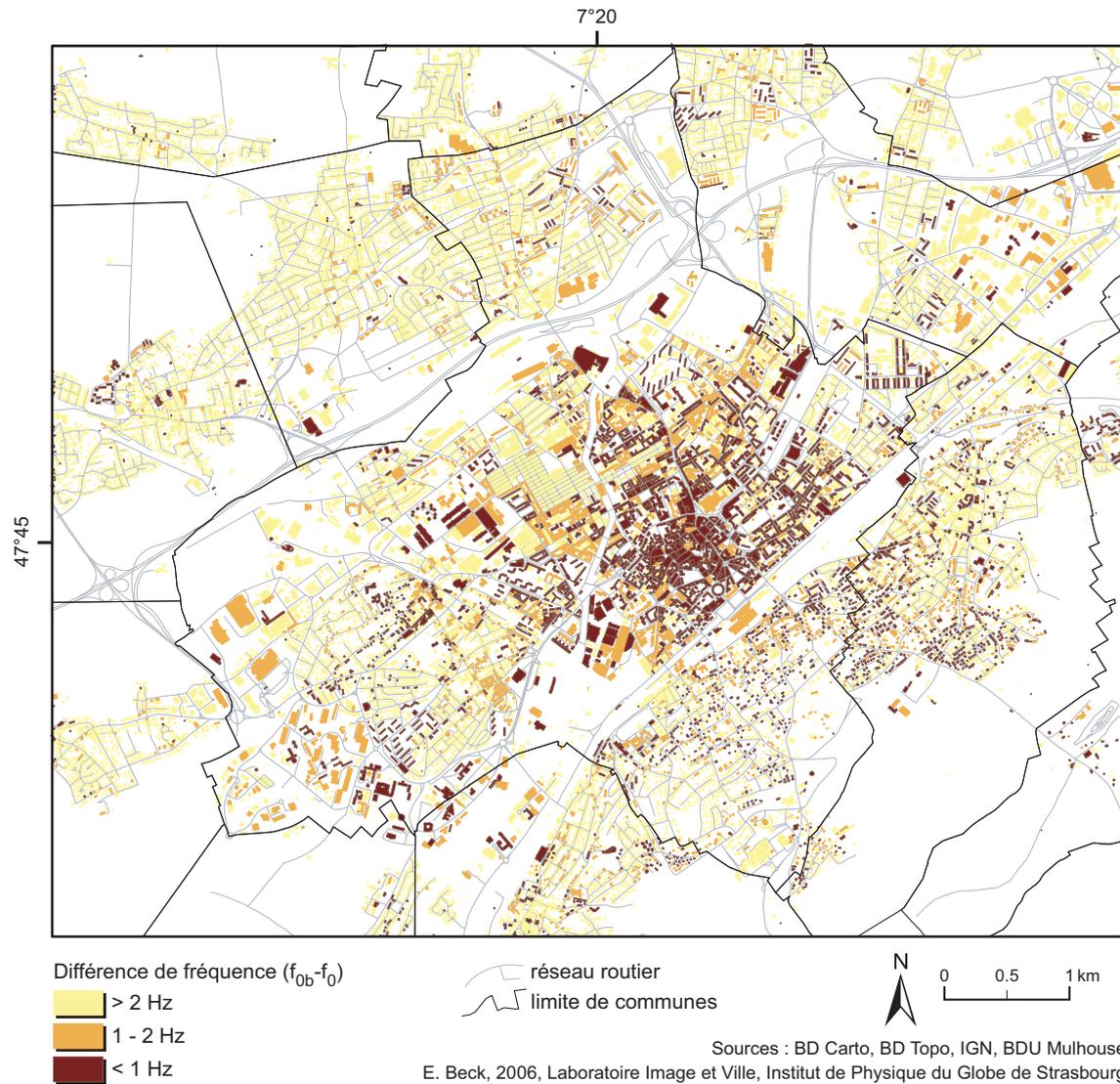


FIG. 3.36 – *Vulnérabilité physique des bâtiments aux tremblements de terre. La vulnérabilité physique est liée à l'écart entre la fréquence fondamentale du site et la fréquence fondamentale du bâti : plus l'écart est minime, plus la vulnérabilité est importante. Les bâtiments des communes de Mulhouse et Riedisheim sont les plus vulnérables (62 % des bâtiments avec Δf_0 inférieure à 1 Hz sont localisés à Mulhouse, 21 % à Riedisheim).*

La typologie de vulnérabilité fonctionnelle du bâti adaptée à nos données est décrite par le tableau 3.6. La typologie proposée au paragraphe 2.3.2.4 pour les surfaces non construites a pu être appliquée telle quelle.

Attributs	Modalités
Fonction	Résidentielle, industrielle, commerciale, artisanale/agricole, culturelle, religieuse, sportive, enseignement, instance dirigeante, secours, services de maintien de l'ordre, médicale, établissement carcéral, autre tertiaire, non définie
Population sensible	Oui/non
IGH	Oui/non
Seveso	Seuil haut

TAB. 3.6 – *Attributs de vulnérabilité fonctionnelle du bâti adaptés aux données disponibles. Les attributs et modalités décrits par ce tableau diffèrent de ceux présentés dans le tableau 2.4 car nous avons dû adapter notre typologie aux données dont nous disposons.*

La carte 3.37 synthétise les données de vulnérabilité fonctionnelle, selon la typologie proposée au paragraphe 2.3.4. Quatre niveaux de vulnérabilité (faible, faible à moyenne, moyenne à élevée, élevée) sont définis. Sur les 4 773 bâtiments dont la fonction est renseignée, on recense 76.8 % de vulnérabilité faible, 18.8 % de vulnérabilité faible à moyenne, 4.3 % de vulnérabilité moyenne à élevée (instances dirigeantes, services de secours, hôpitaux, police et gendarmerie) et 0.2 % de vulnérabilité élevée (bâtiments points sources). Dans le contexte précis de la gestion de crise, puisque la typologie adoptée correspond à ce contexte particulier, les trois quarts des bâtiments de l'agglomération mulhousienne sont caractérisés par une vulnérabilité faible.

La carte indique également la localisation des ERP, qui sont concentrés dans Mulhouse ou le long de zones d'activités (Kaligone à Kingersheim, directement au nord de Mulhouse). Au total, on ne compte pas moins de 413²⁶ ERP de catégories 1, 2 et 3 (cf. § 2.3.2.2) dans la zone d'étude, dont 219 pour la seule commune de Mulhouse.

La représentation en trois dimensions permet de se figurer la localisation des IGH dans l'agglomération (fig. 3.38). Les bâtiments de l'hôpital Emile Muller apparaissent nettement sur la droite au premier plan, tout comme les tours du quartier des Coteaux (à gauche), tandis que se dégage la tour de l'Europe (une centaine de mètres de hauteur) au centre. Rappelons qu'une même valeur de hauteur est attribuée à un ensemble de bâtiments mitoyens et que la valeur de hauteur conservée correspond à la valeur maximale de l'ensemble. Si bien que la hauteur de la tour de l'Europe est également appliquée aux bâtiments qui sont accolés à sa base ou suffisamment proches pour être intégrés au même ensemble de bâtiments mitoyens. Au total, l'ensemble de l'agglomération compte 61 IGH. La moitié correspond à des bâtiments industriels, six à des logements, trois à des édifices religieux, deux à des services de secours, un à une structure sportive et deux à des bâtiments à fonction médicale. Les autres ont une fonction indéfinie.

²⁶L'agglomération compte en réalité 435 ERP, cependant, 22 d'entre eux n'ont pas pu être localisés.

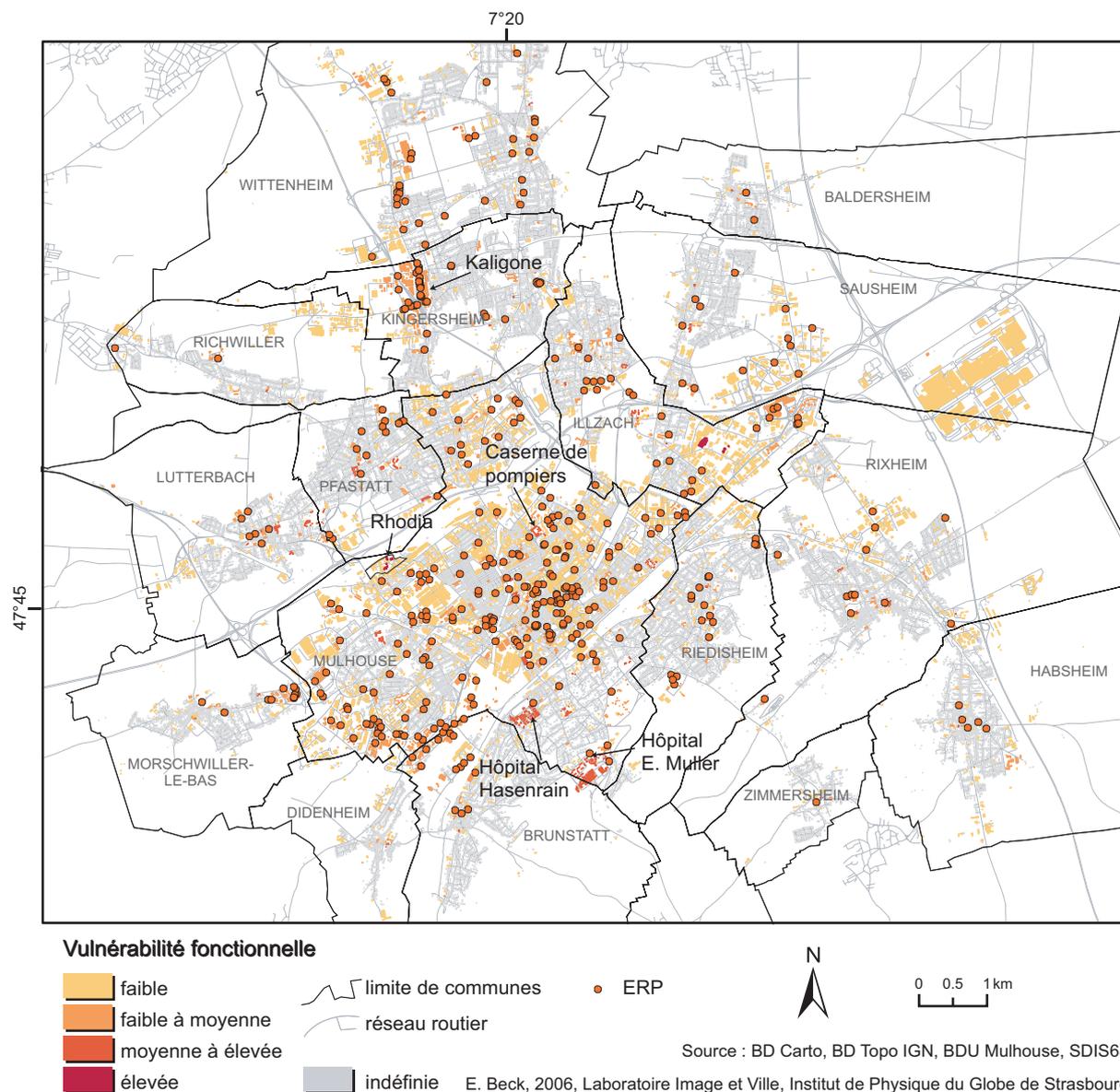
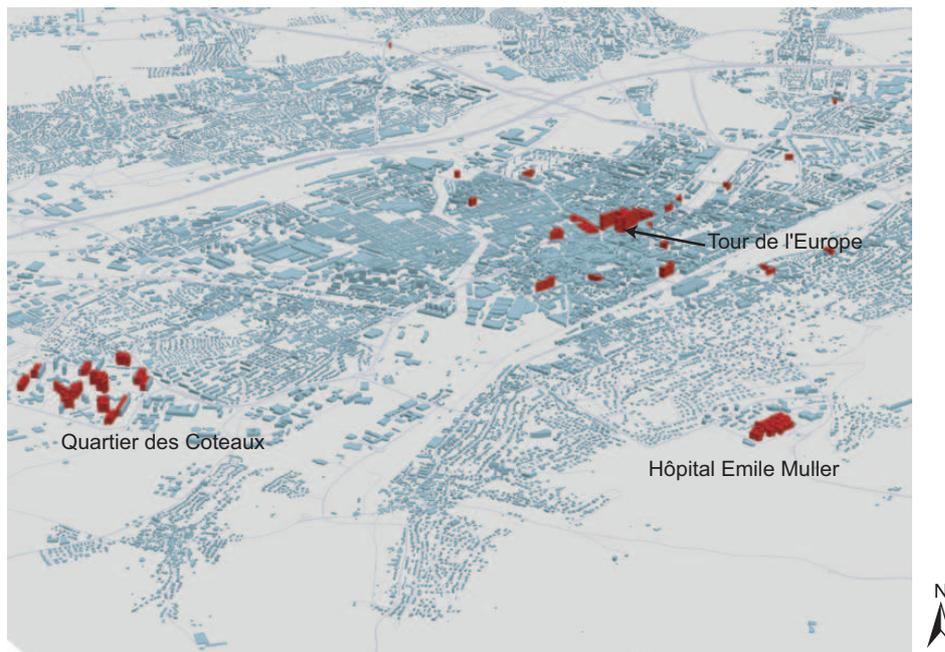


FIG. 3.37 – *Vulnérabilité fonctionnelle du bâti et établissements recevant du public. La dominante de couleur grise s’explique par le fait que peu de données de fonction des bâtiments soient disponibles. Les trois quarts des bâtiments pour lesquels cette fonction est renseignée sont caractérisés par une vulnérabilité fonctionnelle faible. Par ailleurs, plus de la moitié des ERP sont localisés dans la ville de Mulhouse.*



E. Beck, 2006, Laboratoire Image et Ville, Institut de Physique du Globe de Strasbourg

FIG. 3.38 – Représentation en trois dimensions des IGH. Au premier plan, l'hôpital Emile Muller apparaît nettement, tout comme la tour de l'Europe, située dans le centre ville de Mulhouse, et le quartier des Côteaux, à l'ouest (azimut : 0° ; angle d'inclinaison : 23° avec le centre de la ville).

3.2.4.2 Vulnérabilité de la population

– Densités de population

Comme annoncé dans le paragraphe 2.3.3.1, l'unité de recensement la plus fine a été prise en compte en fonction du découpage de chaque commune par l'INSEE :

- l'îlot pour Illzach, Kingersheim, Mulhouse, Riedisheim, Rixheim et Wittenheim ;
- l'IRIS pour Brunstatt, Lutterbach, Pfastatt et Sausheim ;
- la commune dans sa totalité pour Baldersheim, Didenheim, Habsheim, Morschwiller-le-Bas, Richwiller et Zimmersheim.

Les densités ramenées à la surface totale de l'îlot atteignent des valeurs comprises entre 3²⁷ et 54 160 hab./km² (fig. 3.39). Les valeurs les plus élevées sont rencontrées dans la ville de Mulhouse, ainsi qu'à Illzach et Kingersheim. Les secteurs de densité nulle correspondent aux îlots non urbanisés ou à vocation commerciale ou industrielle, autrement dit les secteurs vides de population résidante. La plupart des communes voisines de Mulhouse sont caractérisées par des valeurs de densité faible (moins de 5 000 hab./km²). La surface de référence utilisée pour calculer des densités influence les représentations cartographiques des résultats, puisque le fait de considérer un IRIS plutôt qu'un îlot a tendance à lisser les extrêmes et ne représente qu'une valeur moyenne. Néanmoins, les densités faibles rencontrées dans ces IRIS indiquent certainement une surface non bâtie importante et/ou un

²⁷Cette valeur, très faible, correspond à la densité d'un îlot étendu (5.6 km²), très peu urbanisé et dans lequel 17 individus ont été recensés.

tissu urbain plus lâche : l'analyse de la carte de densité calculée à partir de la surface bâtie permettra d'expliquer ces faibles valeurs.

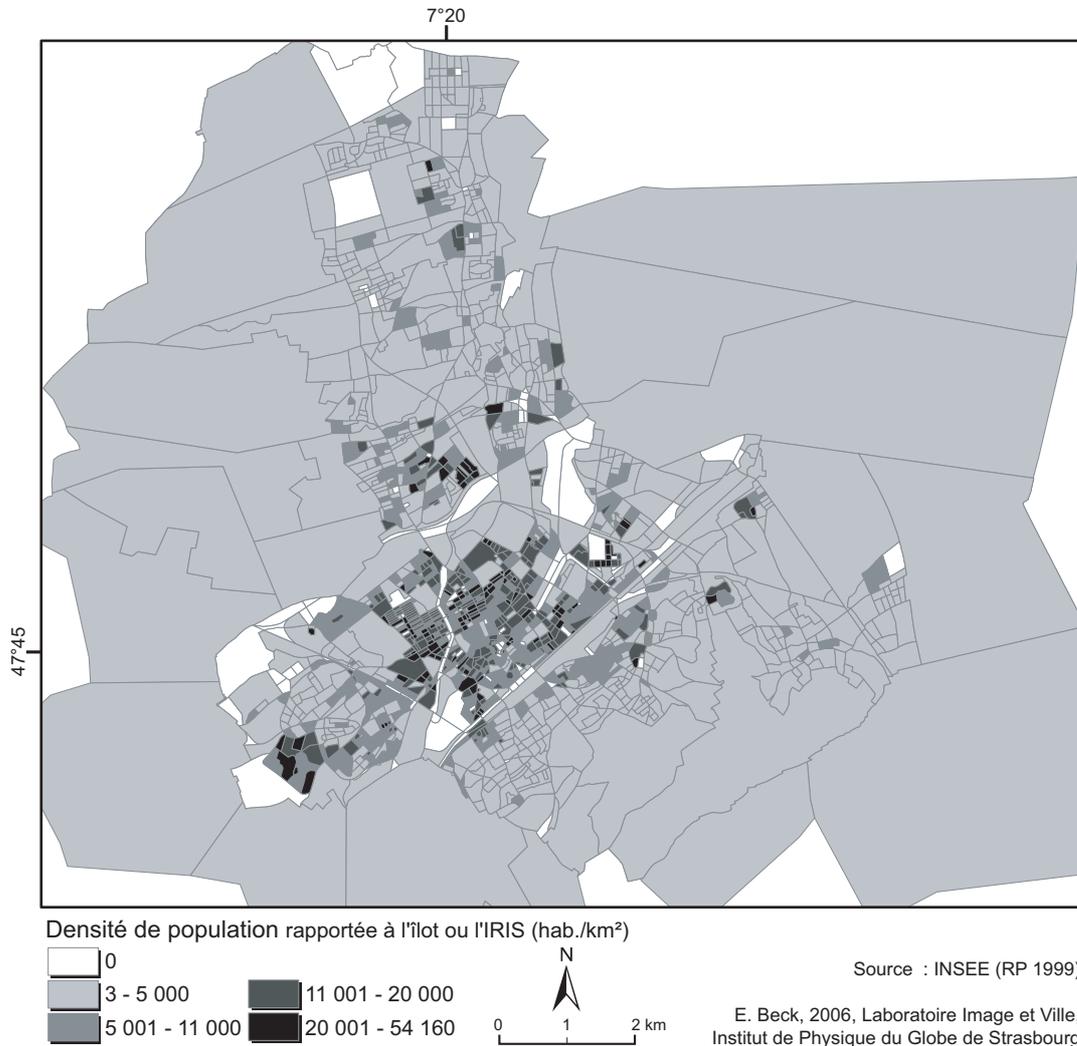


FIG. 3.39 – Densités de population ramenées à la surface de l'îlot, de l'IRIS ou du territoire communal. Les densités les plus élevées sont rencontrées dans les quartiers populaires et dans les centres des communes subdivisées en îlots.

Lorsqu'on ramène la population à la surface bâtie réelle, on obtient des valeurs de densité bien plus élevées, entre 29 et 1 620 702 hab./km², ce qui correspond à une densité de 1.6 hab./m² (fig. 3.40). Le tableau 3.7 indique les valeurs minimales et maximales obtenues par les deux méthodes (a : calcul de la densité à partir de la surface des îlots ou des IRIS ; b : calcul de la densité à partir de la surface bâtie). Certains secteurs sont dotés d'une densité de population nulle. Trois explications peuvent être avancées : la première indique que l'îlot n'est pas urbanisé, donc qu'une surface bâtie ne peut être calculée ; dans un deuxième cas, l'îlot (ou l'IRIS) est urbanisé, mais la population est nulle au moment du recensement (zones commerciales, industrielles...), ce qui peut ne plus être le cas actuellement ; enfin, dans un troisième cas de figure, l'îlot (ou l'IRIS) est urbanisé, les effectifs de population devraient être non nuls, mais il n'y a pas de données de recensement pour l'unité (îlot, IRIS) correspondante.

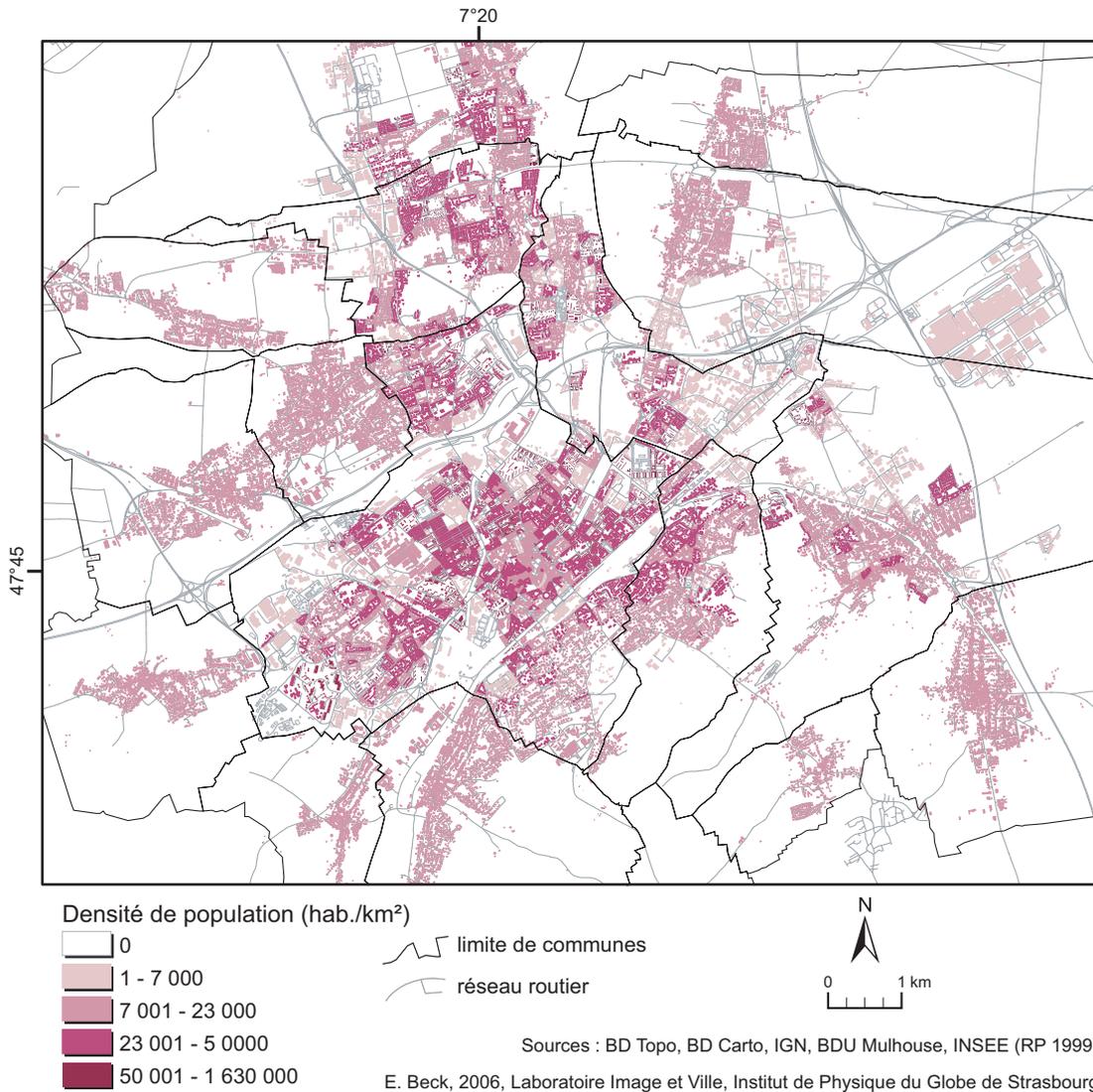


FIG. 3.40 – Densités de population ramenées à la surface bâtie et par bâtiment. Les densités les plus élevées sont rencontrées dans les quartiers populaires et dans les centres des communes mais les valeurs ont considérablement augmenté (quartier populaire des Coteaux : la densité d'un des îlots passe de 450 hab./km² à 169 864 hab./km²). L'augmentation est aussi visible pour les îlots ruraux (Habsheim : la densité passe de 350 hab./km² à 11 517 hab./km²).

Méthode	Densité minimum (hab./km ²)	Densité maximum (hab./km ²)
a : Îlot ou IRIS	3	54 160
b : Surface bâtie	29	1 620 702

TAB. 3.7 – Minimum et maximum de densité de population obtenus par les deux méthodes. Méthode a : la densité est calculée en tenant compte de la surface de l'îlot ou de l'IRIS. Méthode b : la densité est calculée à partir de la surface bâtie (surface des bâtiments au sol). Le passage de la méthode a) à la méthode b) entraîne une très forte augmentation des densités.

Les valeurs les plus élevées (1 620 702 hab./km² puis 682 460 hab./km²) correspondent à deux cas de figure visiblement aberrants. Le premier correspond à un îlot du centre d'Illzach dont la surface bâtie est près de 112 m² (un seul bâtiment est représenté dans la BD Topo® et les orthophotos). Cependant, 181 personnes ont été recensées dans cet îlot, ce qui serait vraisemblable s'il s'agissait d'un immeuble très élevé. Or, la hauteur de ce bâtiment, telle qu'elle est indiquée dans la BD Topo ®, est de 4 m, soit un seul étage ! Le deuxième cas correspond à un IRIS de la commune de Brunstatt. En 1999, il comptait 2 935 habitants pour 19 bâtiments construits (surface bâtie : 4 301 m²), ce qui est peu pour une telle population, dans un secteur d'habitat en majorité individuel. La valeur élevée de densité obtenue (682 460 hab./km²) peut provenir d'un décalage dans la date de mise à jour des données de la BD Topo, dans la définition des limites de l'IRIS au dernier recensement ou encore d'un erreur de recensement. Finalement, les valeurs très élevées obtenues montrent les incohérences générées par la combinaison de données collectées en des périodes distinctes.

Les densités les plus élevées sont rencontrées dans les secteurs les plus denses (centre ville, tours et barres d'immeubles). Le lissage dû à la surface plus grande des IRIS est visible, même si on observe des densités plus élevées qu'en prenant en compte la totalité de la surface de l'îlot (par exemple, la densité de population d'Habsheim passe de 350 hab./km² à 11 517 hab./km²). Cette différence est aussi visible à Mulhouse (un des îlots du quartier des Coteaux voit sa densité passer de 27 450 hab./km² à 169 864 hab./km²).

Les densités ont été discrétisées en quatre classes de manière à figurer différents niveaux de vulnérabilité qui seront intégrés dans l'indice de vulnérabilité totale. Les seuils choisis visent à représenter des différences de tissu urbain. Ils ont été définis suite à une analyse de la morphologie urbaine de la région de Mulhouse, si bien que ces seuils seraient certainement différents dans un autre cadre d'étude.

- **nulle** : densité de population égale à zéro ; ce sont soit des îlots/IRIS non urbanisés (surface bâtie nulle), soit des îlots/IRIS non peuplés (effectifs de population nuls ou îlot/IRIS non recensé) ;
- **faible** : densité de population inférieure ou égale à 7 000 hab./km² ; il s'agit principalement des zones non résidentielles (industrielles, commerciales...), caractérisées par une surface au sol importante mais par un effectif de population recensée faible ;
- **faible à moyenne** : densité de population entre 7 001 hab./km² et 23 000 hab./km² ; cette classe regroupe les quartiers résidentiels à habitat individuel des zones rurales ou des secteurs urbains aisés ;
- **moyenne à élevée** : densité de population entre 23 001 hab./km² et 50 000 hab./km² ; quartiers résidentiels à habitat collectif peu dense ou à habitat mixte (individuel et collectif) ;
- **élevée** : densité de population supérieure à 50 000 hab./km² : quartiers résidentiels à habitat collectif dense ou cas très isolés.

La prise en compte de la surface bâtie pour calculer la densité de population permet de révéler davantage les extrêmes (densités faibles ou très élevées) et de prendre en compte la vulnérabilité de la population de manière plus réaliste.

– Représentation cognitive des risques par la population de l'agglomération mulhousienne

L'évaluation de la vulnérabilité de la population peut être menée par différentes méthodes. La méthode quantitative décrite dans le paragraphe précédents a permis de quantifier la vulnérabilité des habitants par le calcul de la densité de population. A présent, nous abordons la vulnérabilité des citoyens par l'intermédiaire d'une approche qualitative, celle des facteurs de vulnérabilité. Notre objectif est d'aboutir à un indice de vulnérabilité lié à la représentation cognitive des risques.

Comme explicité dans le paragraphe 2.3.3.2, la représentation cognitive a été étudiée par l'intermédiaire d'une enquête par questionnaire. Nous allons à présent en décrire les principaux résultats.

• Population enquêtée

491 individus habitant ou travaillant dans l'agglomération mulhousienne ont été interrogés entre l'été 2004 et fin 2005. La zone d'étude s'étend un peu plus largement que le quadrillage délimité par les mesures de bruit car nous avons construit l'échantillon en nous fondant sur les effectifs de recensement à l'échelle communale : il fallait donc pouvoir inclure des communes dans leur totalité. Dans ce cadre, nous avons délimité un espace de tissu urbain continu centré autour de Mulhouse et englobant les communes suivantes : Baldersheim, Brunstatt, Didenheim, Habsheim, Illzach, Kingersheim, Lutterbach, Morschwiller-le-Bas, Mulhouse, Pfastatt, Riedisheim, Rixheim, Sausheim et Wittenheim (fig. 3.1, p. 124).

Parmi les personnes interrogées, 229 sont des habitants (population nocturne), 208 des actifs et 54 font partie du groupe "public". N'ayant pas obtenu l'autorisation d'enquêter auprès de la population carcérale, nous n'avons pas pu prendre en compte ce segment de population. La composition de l'échantillon est décrite en annexe 13.

• Une représentation des risques en décalage avec la réalité

1. Une place restreinte laissée aux risques majeurs, au bénéfice des nuisances et préoccupations du quotidien

Les enquêtés semblent inquiets pour leur sécurité personnelle et quotidienne ou pour celle de leur emploi et ne paraissent pas préoccupés par les risques majeurs. A la question "De manière générale, quels sont les problèmes de société qui vous préoccupent le plus ?" (Q4²⁸), 63.1 % des enquêtés ont cité l'insécurité²⁹, 25.9 % le chômage et les problèmes liés à l'emploi et 17.1 % les relations à autrui, qui regroupent les problèmes d'incivisme, de non-respect, de dégradation des relations entre individus, etc. (cf. annexe 14). A l'opposé, les catastrophes ne semblent inquiéter que 0.6 % des personnes interrogées. Les soucis du quotidien et la situation économique d'une manière générale dominent dans les préoccupations des enquêtés. En effet, le chômage et la situation économique totalisent 37.3 % des réponses données et les autres problèmes liés au quotidien 79.2 % des réponses citées³⁰.

²⁸Les codes Q4, Q7...renvoient aux numéros des questions (cf. annexe 5 pour l'intitulé détaillé des questions).

²⁹Sous la réponse "insécurité" il faut comprendre l'ensemble des termes ou expressions se rapportant à cette thématique : insécurité, agression, délinquance, vol... .

³⁰Le total des pourcentages dépasse 100 % en raison des réponses multiples. Les taux de réponse de chaque item ont été rapportés au nombre d'enquêtés.

Ces résultats confirment une première impression observée au cours d'une enquête plus réduite, qui avait en partie porté sur la région mulhousienne. Nous avons remarqué que le quotidien l'emportait sur l'exceptionnel [Beck *et al.*, 2004]. Cette tendance est également observée à une échelle nationale, même si le classement des réponses est quelque peu différent : le baromètre 2004 de l'IRSN indique que 22.3 % des Français considèrent le chômage comme le problème le plus préoccupant et 17.9 % citent l'insécurité, suivie de la misère et l'exclusion avec 13.6 % [El Jammal et Baumont, 2005]. L'importance donnée au chômage peut être expliquée par la situation économique actuelle de la zone d'emploi de Mulhouse : au quatrième semestre 2005, le taux de chômage atteignait 11.7 % (hausse de 0.6 %³¹ par rapport à 2004, alors que la plupart des autres zones d'emploi alsaciennes étaient caractérisées par des taux en baisse. Au même moment, la moyenne alsacienne se situait à 8.6 % et la moyenne nationale à 9.6 [DRTEFP, 2006]. Ce taux particulièrement élevé dans la région mulhousienne explique probablement l'inquiétude des enquêtés. Concernant l'insécurité, citée en premier lieu par les personnes interrogées, le taux de réponse élevé fait certainement transparaître la large médiatisation de la politique française en matière de sécurité ainsi que le contexte local.

2. Un sentiment d'exposition aux risques majeurs peu développé, en contradiction avec une relative bonne connaissance des aléas

La domination des nuisances ou des risques du quotidien par rapport aux risques majeurs apparaît également lorsqu'on demande aux personnes interrogées quels sont les risques auxquels elles se sentent exposées à leur domicile, sur leur lieu de travail ou sur le lieu qu'elles fréquentent dans la journée (Q7) : elles font à nouveau référence à l'insécurité, qui arrive en première position des réponses données, avec un taux de 35.4 %, puis aux accidents de la route (12.0 %), aux accidents du travail (10.0 %), à la pollution (9.0 %) et au chômage (8.1 %). Le "biais" que constitue le groupe des actifs intervient ici puisque les accidents susceptibles de se produire sur le lieu de travail leur sont propres (cf. annexe 14). Notons par ailleurs que près d'un quart des enquêtés (23.2 %) ne se sentent exposés à aucun risque.

Pourtant, si on demande aux personnes interrogées quelle serait la catastrophe majeure qui pourrait se produire dans l'agglomération mulhousienne (Q10), ils citent en premier lieu les tremblements de terre (36.7 %), puis les catastrophes industrielles (24.0 %) et enfin une catastrophe nucléaire (25.7 %) (cf. annexe 14). Ces réponses traduisent une bonne connaissance du contexte local ("on est sur une faille", "Fessenheim n'est pas loin", "il y a des usines chimiques dangereuses à Mulhouse") ou le vécu ou la connaissance d'une catastrophe ou d'un incident plus ou moins proche dans le temps et ayant touché la région : "ça a tremblé le mois dernier"³² ; plusieurs personnes ont cité la catastrophe de Tchernobyl (26 avril 1986) pour expliquer leurs craintes face à la centrale nucléaire de Fessenheim.

Les autres catastrophes citées relèvent principalement du vécu ou de la connaissance d'événements locaux (tempêtes, 3.7 %, en relation avec la tempête de 1999 ; crash d'avions, 2.4 % : le crash de deux Airbus A320, à Habsheim - 26 juin 1988 - et au Mont Sainte-Odile - 20 janvier 1992 - ont marqué les esprits) ou ayant marqué l'actualité (attentats, 6.3 % : les attentats de Madrid se sont produits le 11 mars 2004, ceux de Londres le 7 juillet 2005 ; explosion de gaz, 2.9 % : le 27 décembre 2004, l'explosion consécutive à une fuite de gaz a causé la mort de 17 personnes à Mulhouse).

³¹En points.

³²Deux tremblements de terre se sont produits alors que nous menions notre enquête. Ils ont été ressentis par la population mulhousienne.

Finalement, il y a contradiction entre les risques auxquels les enquêtés se sentent exposés et la connaissance par ces derniers du contexte local et de son potentiel à engendrer des catastrophes majeures. Ce déni peut indiquer une sous-estimation générale des risques majeurs ³³.

3. Une population se sentant peu informée et qui ne connaît que partiellement les consignes

Le sentiment de ne pas être exposé aux risques majeurs peut provenir d'une mauvaise information. On peut très bien avoir conscience de l'existence d'une menace sans pour autant connaître avec précision sa localisation et l'extension de ses effets et connaître ainsi son exposition personnelle. La prise en compte de la dimension spatiale du risque par la population n'est pas spontanée : si un individu ne fait pas la démarche d'aller se renseigner à la mairie ou à la préfecture, il attend des indications sur son degré d'exposition, que ce soit par le biais d'un document d'information, d'une réunion, etc.

Dans l'agglomération mulhousienne, cette hypothèse semble vérifiée pour expliquer le décalage entre la bonne connaissance du contexte local et un sentiment d'exposition peu développé. En effet, lorsqu'on demande s'ils se sentent bien informés sur les risques de manière générale et sur les consignes à suivre en cas de catastrophe plus spécifiquement, 68.0 % des enquêtés ont répondu "non" à la première question (Q25 ³⁴) et 74.1 % d'entre eux "non" à la deuxième question (Q19 ³⁵). Cela démontre un déficit d'information ou d'appropriation de l'information. Cette proportion élevée d'habitants ou d'actifs se sentant peu informés sur les risques témoigne du faible impact de la campagne d'information réalisée en avril 2004 dans la région mulhousienne. En effet, une plaquette d'information a été distribuée aux habitants et aux entreprises de la ville de Mulhouse par l'intermédiaire d'un journal local (l'Echo Mulhousien).

Cette mauvaise connaissance des consignes à suivre (tab. 3.8) pose problème, puisque 64.6 % de la population interrogée ne connaissent pas les consignes de sécurité à suivre en cas de catastrophe naturelle (63.3 % pour l'accident industriel). Par ailleurs, seuls 17.2 % des personnes interrogées sont en mesure de citer **au moins** une bonne réponse et 10.6 % ne citent **que des mauvaises réponses** (10.2 % pour l'accident industriel).

Nous nous sommes interrogées sur l'influence de la localisation ³⁶ sur le sentiment d'être suffisamment informé. L'analyse des réponses par commune permet d'identifier l'existence d'éventuelles disparités d'une commune à l'autre en termes d'information de la population, c'est-à-dire si des individus font l'objet d'un déficit important dans ce domaine (cf. annexe 14 ³⁷). D'un point de vue opérationnel, ce croisement indique si des campagnes ciblées et

³³Précisons que les questions Q4 et Q7 constituent des questions ouvertes et que les résultats sont différents à partir du moment où l'on donne une liste d'items. Par exemple, à la question Q5, dont l'intitulé est proche de celui de la question Q4, 33.8 % des personnes interrogées considèrent les catastrophes naturelles comme très préoccupantes (le taux de réponse à cette question est de 39.1 % pour les catastrophes industrielles et de 44.0 % pour les centrales nucléaires). De même, 29.1 % des enquêtés se sentent très exposés au risque sismique, 22.8 % au risque industriel, 26.3 % au risque nucléaire lorsqu'on leur fournit explicitement une liste de risques (Q8, qui est la version fermée de la question ouverte Q7).

³⁴Q25 : Vous estimez-vous suffisamment informé(e) sur les risques en général ?

³⁵Q19 : Vous estimez-vous suffisamment informé(e) sur les consignes de sécurité à suivre en cas de catastrophe ?

³⁶Par localisation nous entendons commune de résidence ou de lieu de travail ou de fréquentation, afin d'identifier d'éventuelles différences dans l'information de la population d'une commune à l'autre.

³⁷L'interprétation de tels pourcentages nécessite un minimum de prudence étant donné les faibles effectifs interrogés dans certaines communes : un individu interrogé à Baldersheim, trois à Morschwiller-le-Bas, sept à Habsheim, huit à Brunstatt, neuf à Lutterbach.

Réponses (en %)	Consignes à suivre en cas de cat. naturelle	Consignes à suivre en cas d'accident indus.
Bonne réponse	17.3	22.2
Réponse mixte	7.5	4.3
Mauvaise réponse	10.6	10.2
Ne sait pas	64.6	63.3

TAB. 3.8 – *Connaissance des consignes de sécurité à suivre en cas de catastrophe naturelle ou d'accident industriel (Q18). "Bonne réponse" signifie que l'enquêté a cité au moins une bonne consigne. "Réponse mixte" a été attribué aux personnes ayant donné au moins une bonne réponse et au moins une mauvaise réponse. "Mauvaise réponse" indique que l'enquêté n'a donné que des mauvaises consignes.*

organisées par chaque municipalité sont nécessaires et, si c'est le cas, dans quelle commune et sur quelle thématique (risques en général ou consignes de sécurité).

Les résultats indiquent que les populations de Kingersheim et de Rixheim ont le sentiment d'être moins informées, tant sur les risques que sur les consignes, que les habitants des autres communes. L'origine de cette différence est difficile à interpréter. Globalement, si on écarte les communes à faible effectif interrogé et les deux communes faisant l'objet d'un déficit d'information, les autres se trouvent dans la tendance moyenne des résultats observés pour l'ensemble de l'agglomération, et les différences d'une municipalité à une autre sont minimes.

4. Des actifs préoccupés par leur devenir, des habitants plus sensibles à leur sécurité personnelle

Parmi les différents croisements possibles, nous avons analysé l'influence de l'appartenance à un groupe (habitants/actifs/public) sur les risques auxquels les individus se sentent exposés (tab. 3.9).

L'insécurité apparaît là encore comme le risque auquel les habitants (41.9 % des réponses) et les actifs, dans une moindre mesure (29.8 % ; 29.6 % pour le public), se sentent les plus exposés.

Les habitants citent en troisième position la pollution (14.0 %), qui illustre là encore l'inquiétude pour les nuisances quotidiennes et diffuses. Les actifs se replacent dans leur cadre professionnel pour citer en troisième position les accidents du travail (21.2 %). Notons qu'ils identifient majoritairement des risques internes à leur entreprise et que peu d'entre eux citent les dangers exogènes (d'origine naturelle ou technologique).

Cette première analyse des résultats de l'enquête permet de confirmer deux hypothèses que nous avons formulées : les campagnes d'information menées par les industriels et les autorités compétentes ont un faible impact sur la connaissance des risques et des consignes de sécurité par la population et il existe des différenciations sociales dans la représentation cognitive des risques (liées à une différenciation diurne/nocturne dans notre cas).

- *Indices synthétiques de vulnérabilité sismique/technologique*

Les analyses des réponses, simples ou croisées, permettent d'identifier la faible représentation cognitive du risque par une majorité de la population, malgré une bonne connaissance

Risques cités (%) / Groupe	Habitants	Actifs	Public	Total
Insécurité	41,9	29,8	29,6	35,4
Aucun	19,7	24,0	35,2	23,2
Accidents de la route	9,6	14,9	11,1	12,0
Accidents du travail	0,4	21,2	7,4	10,0
Pollution	14,0	5,3	1,9	9,0
Chômage	9,2	8,2	3,7	8,1
Relations à autrui dégradées	6,1	7,2	9,3	6,9
Dégradation de la santé	6,1	3,8	13,0	5,9
Accidents divers	7,9	4,8	0,0	5,7
Risque industriel	7,9	2,9	3,7	5,3
Risque naturel	5,2	5,8	0,0	4,9
Autre	3,5	6,3	5,6	4,9
Bruit	7,0	1,9	1,9	4,3
Explosion/incendie	3,1	3,4	3,7	3,3
Risque nucléaire	5,2	0,5	1,9	2,9
Toxicomanies	2,2	3,4	3,7	2,9
Misère	2,6	2,4	0,0	2,2
Mauvais cadre de vie	3,1	0,5	1,9	1,8
Ne sait pas	1,7	1,0	3,7	1,6
Dégradation de l'environnement	2,2	0,5	0,0	1,2
Terrorisme	0,9	1,0	1,9	1,0

Le total des pourcentages dépasse 100 % en raison des réponses multiples.

	1er rang
	2e rang
	3e rang

TAB. 3.9 – Risques auxquels les individus enquêtés se sentent exposés, selon leur groupe d'appartenance (habitants, actifs, public). Chaque catégorie d'enquêtés relève le même risque principal (l'insécurité) avec des variantes pour les deuxième et troisième positions. Les habitants sont davantage sensibles pour leur sécurité personnelle et leur cadre de vie quotidien (insécurité, pollution, relations à autrui). Quant aux personnes fréquentant les lieux publics, plus d'un tiers d'entre elles ne se sent exposé à aucun risque.

du contexte local. A présent, les résultats vont être présentés sous la forme de deux indices synthétiques de vulnérabilité, prenant en compte la représentation des risques, la connaissance des risques et des facteurs contraignants socio-démographiques et de localisation (cf. § 2.3.3.2).

Bien que l'on observe une tendance générale identique quel que soit l'indice (fig. 3.41), les individus ne sont pas vulnérables de la même façon aux deux aléas considérés (sismique et technologique). Cela est vérifié par l'analyse de l'écart, pour chaque individu, entre l'indice de vulnérabilité à l'aléa sismique et celui à l'aléa technologique. Plus celui-ci est grand, plus les vulnérabilités aux deux aléas sont différentes. Nous avons calculé la moyenne de cet écart (0.14) et l'écart-type à la moyenne de cet écart (0.11). Le maximum est égal à 0.49. Ainsi, l'hypothèse de l'influence de l'aléa sur la vulnérabilité de l'individu est confirmée.

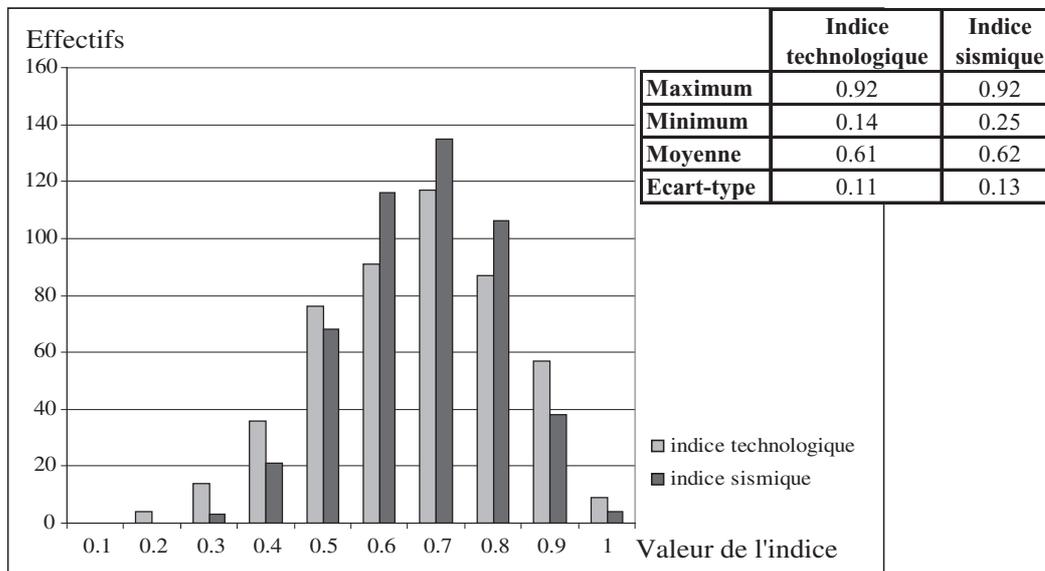


FIG. 3.41 – Indices synthétiques de vulnérabilité aux séismes et aux aléas technologiques.

Les résultats ont été cartographiés afin de vérifier l'importance de la localisation des individus sur les réponses au questionnaire et sur l'indice synthétique de vulnérabilité. Nous avons également souhaité identifier l'existence d'une cohérence spatiale dans les résultats.

La carte 3.42 correspond à une représentation cartographique de l'indice de vulnérabilité sismique dans la zone enquêtée.

Nous pouvons tout d'abord observer que les valeurs de l'indice de vulnérabilité sismique sont relativement élevées ³⁸ (moyenne : 0.62 ³⁹ ; écart-type 0.13) et qu'il n'existe pas réellement de cohérence dans la répartition spatiale des vulnérabilités. Il n'y a pas de différenciation particulière d'une commune à une autre ; on note une vulnérabilité supérieure ou égale à 0.74 dans un des quartiers de Kingersheim, l'un des quartiers de Rixheim et un secteur doté d'un indice inférieur ou égal à 0.43. Il n'existe en tous les cas aucune relation entre la répartition en zones 1b et 2 du zonage sismique et la vulnérabilité. On n'observe pas non

³⁸ Une valeur proche de 1 indique une vulnérabilité élevée.

³⁹ Afin de pouvoir comparer les deux cartes, les mêmes classes de valeurs d'indice ont été adoptées. Nous nous sommes fondées sur la distribution gaussienne des valeurs de l'indice de vulnérabilité aux aléas technologiques pour faire une discrétisation par la moyenne et l'écart-type, en considérant un nombre impair de classes.

plus de cohérence au sein d'une même commune : par exemple, à Kingersheim, Illzach, Riedisheim et Mulhouse, les quartiers sont caractérisés par des vulnérabilités suffisamment hétérogènes pour être intégrées à trois voire quatre classes de valeurs différentes.

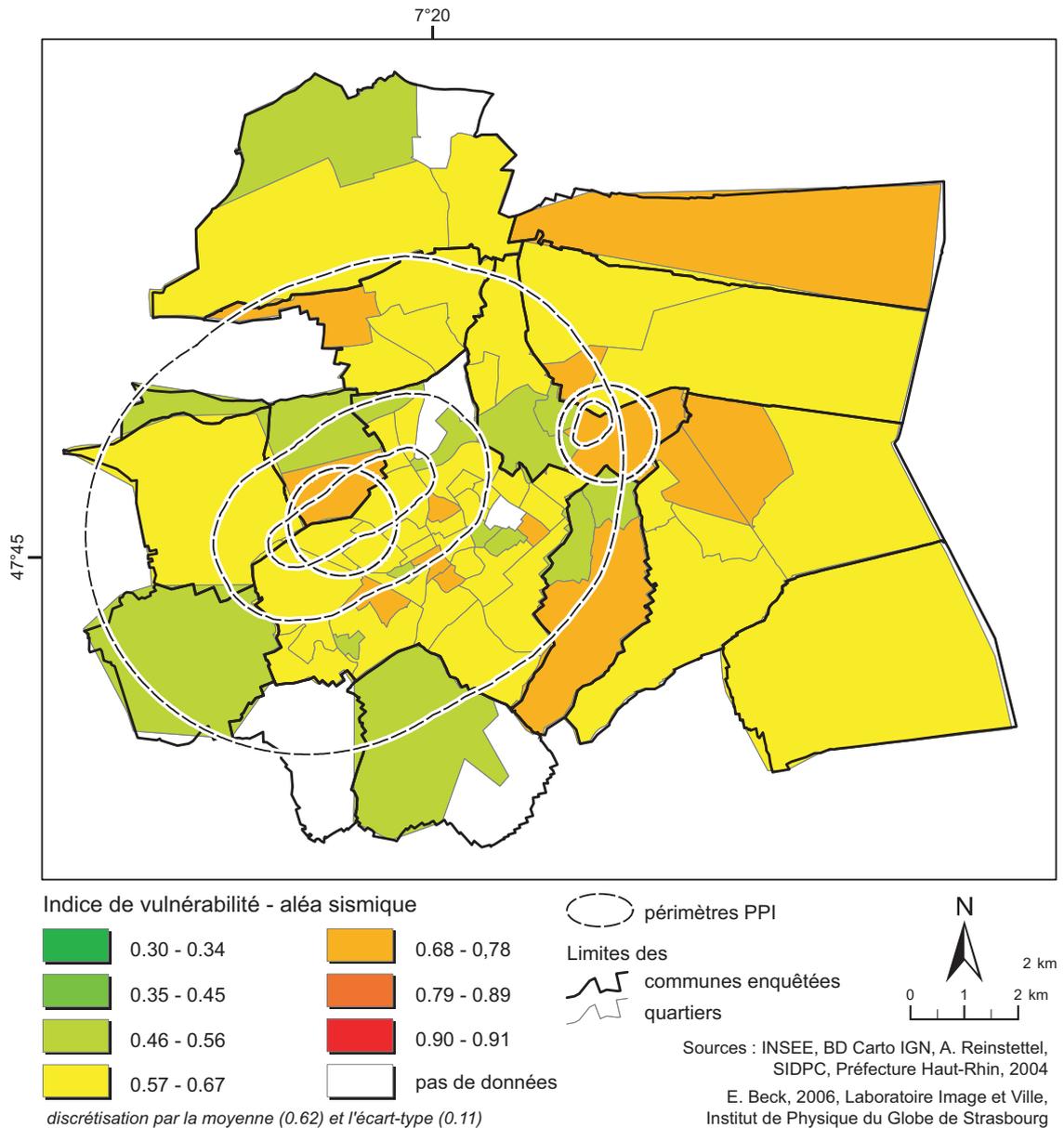


FIG. 3.42 – Représentation cartographique de l'indice de vulnérabilité sismique, calculé à partir de la relation 2.10. Il n'existe pas réellement de logique spatiale dans la distribution de l'indice de vulnérabilité sismique.

La carte 3.43 représente sous forme cartographique les valeurs de l'indice de vulnérabilité technologique, agrégées par quartier. La valeur moyenne de l'indice est à nouveau élevée (fig. 3.41 ; 0.61, à peine moins que la valeur moyenne de l'indice de vulnérabilité sismique, avec un écart-type de 0.11).

La répartition des valeurs est étonnante, puisqu'une logique spatiale se dessine. Si on exclut les communes de Pfastatt et Lutterbach, trois quartiers de la ville de Mulhouse, un quartier de Riedisheim et deux quartiers d'Illzach, la totalité de la surface couverte par

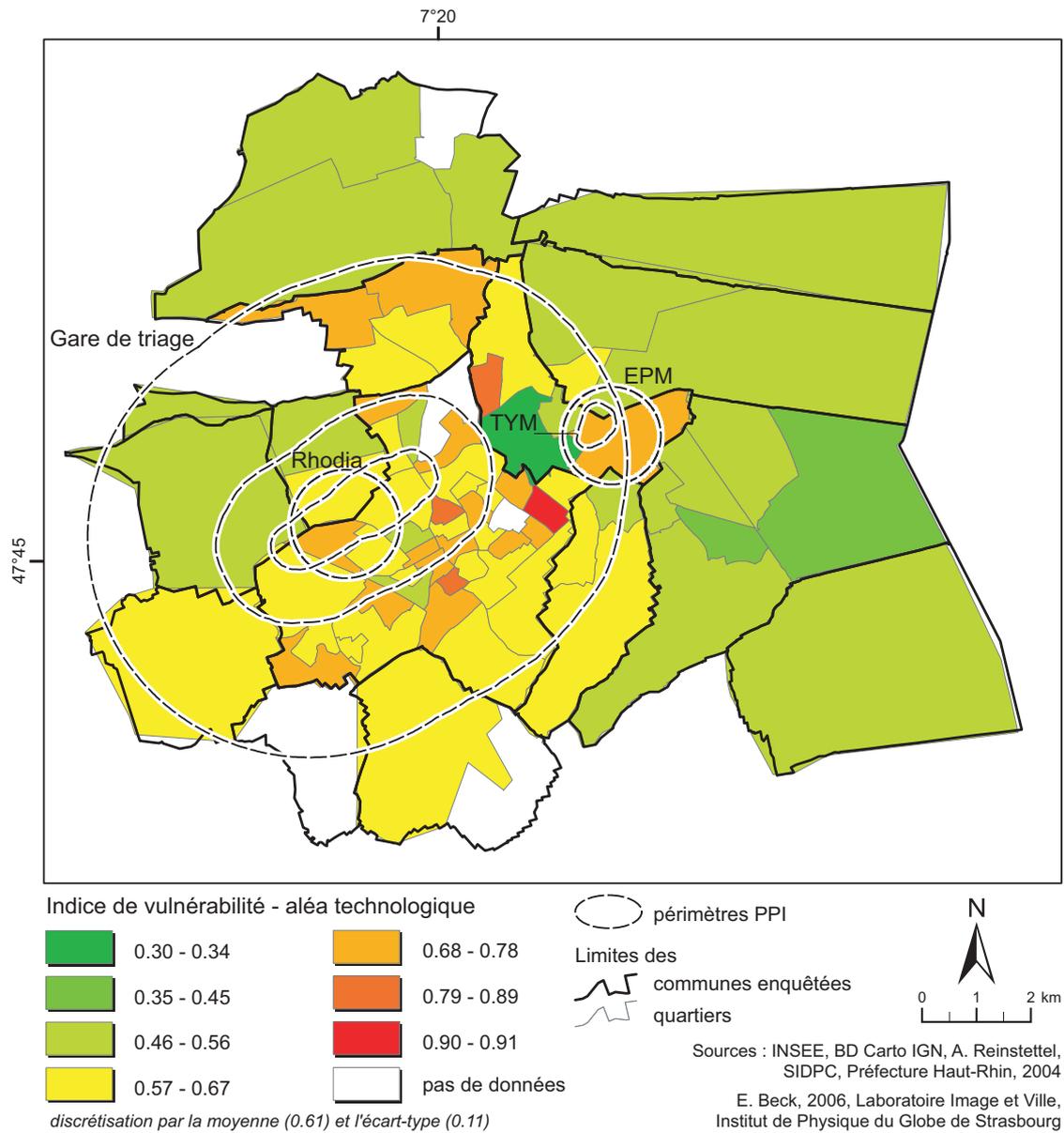


FIG. 3.43 – Représentation cartographique de l'indice de vulnérabilité technologique, calculé à partir de la relation 2.10. Une logique spatiale existe entre l'indice de vulnérabilité technologique et la localisation des enquêtés : étonnamment, les individus localisés à l'intérieur des PPI se sentent davantage vulnérables que ceux qui se trouvent à l'extérieur.

les zonages PPI est caractérisée par des valeurs d'indice élevé (supérieur ou égal à 0.57), à l'opposé des quartiers périphériques de ces zonages (valeurs inférieures ou égales à 0.56). Ceci est d'autant plus étonnant que les communes de Pfastatt et Lutterbach sont séparées du reste de l'agglomération et des sites technologiques dangereux (Rhodia et la gare de marchandises) par une autoroute, une voie ferrée et un canal. On pourrait penser que ces axes de communication constituent des frontières derrière lesquelles la représentation des risques technologiques est réduite.

Nous avons construit notre indice de vulnérabilité pour stigmatiser la représentation cognitive et la connaissance des risques par la population. Nous sommes parties de l'hypothèse qu'une représentation cognitive faible des risques induit une vulnérabilité élevée (tab. 2.7). Or, nous observons des valeurs de l'indice élevées pour les individus localisés à l'intérieur du PPI, ce qui indique une connaissance et/ou une représentation cognitive faible. Ceci est étonnant et pose problème car les personnes localisées à l'intérieur du PPI devraient être plus sensibilisées en raison de leur proximité à la distance à la source de danger et parce qu'elles sont destinataires de campagnes d'information spécifiques de la part des industriels. A l'opposé, des valeurs de vulnérabilité plus faibles (indiquant une représentation cognitive plus élevée) sont observées à l'extérieur des PPI. Ces résultats, plus particulièrement le déficit de représentation cognitive manifeste, posent la question de l'efficacité des campagnes d'information autour des sites industriels dangereux.

La prise en compte de la représentation cognitive des risques dans l'appréciation de la vulnérabilité de la population permet d'entrevoir des différenciations au sein de groupes sociaux, qu'il s'agisse de groupes définis par l'âge des individus, leur catégorie socio-professionnelle ou encore par une dimension temporelle (résidents/actifs/public).

On peut retenir de cette enquête quelques résultats : l'influence mitigée de la localisation des individus sur leur représentation cognitive et d'une manière plus générale sur leur vulnérabilité au danger technologique, une sous-estimation des risques auxquels les individus sont exposés, malgré une bonne connaissance du contexte local du point de vue des aléas, et, enfin, une relative méconnaissance des consignes à suivre en cas de catastrophe.

3.2.4.3 Vulnérabilité totale

La vulnérabilité totale prend en compte les vulnérabilités physique, fonctionnelle, la hauteur du bâtiment et la densité de population, sous la forme d'un indice synthétique (cf. équ. 2.11 et § 2.3.4). Elle est ramenée à l'échelle du bâtiment. Cinq niveaux de vulnérabilité totale sont définis : nulle, faible, faible à moyenne, moyenne à élevée et élevée. La répartition spatiale des niveaux de vulnérabilité totale est illustrée par la figure 3.44. Une vulnérabilité élevée correspond à un bâtiment source d'un potentiel accident technologique, caractérisé par une hauteur élevée (IGH), un écart faible entre la fréquence de résonance du bâti et celle de site et/ou une densité supérieure à 50 000 hab./km². A l'opposé, une vulnérabilité faible correspond à un bâtiment de fonction industrielle (par exemple), caractérisé par un grand écart entre la fréquence de résonance du bâti et celle de site et/ou de densité de population inférieure à 7 000 hab./km².

D'après la carte, la ville de Mulhouse apparaît comme moyennement à très vulnérable, par rapport aux autres communes, davantage caractérisées par une vulnérabilité faible à moyenne. Rappelons que le centre de la ville de Mulhouse est caractérisé par des densités de population relativement élevées et par des écarts entre la fréquence de résonance du

bâti et celle de site plutôt faibles (deux des caractéristiques qui définissent un bâtiment de vulnérabilité élevée). Par ailleurs, Mulhouse concentre les centres de secours, les services médicaux et une part importante des ERP de la région (lycées, université, musées...).

D'un point de vue statistique, la région est faiblement à moyennement vulnérable à 81 % ; 12 % des bâtiments sont caractérisés par une vulnérabilité totale moyenne à élevée et 214 bâtiments (0.6 %) par une vulnérabilité totale élevée, parmi lesquels 145 sont localisés sur le territoire communal mulhousien. La vulnérabilité de la commune de Mulhouse est également illustrée par les chiffres suivants : 27 % des bâtiments ont une vulnérabilité totale moyenne à élevée, 1.9 % une vulnérabilité totale élevée. A l'opposé, d'autres communes sont moins vulnérables : on peut citer par exemple Didenheim (86 % de bâtiments à vulnérabilité faible à moyenne), Habsheim (100 % de vulnérabilité faible et faible à moyenne) ou Morschwiller-le-Bas (97 % de bâtiments à vulnérabilité faible à moyenne), qui constituent des communes rurales à l'origine, rattrapées par l'urbanisation et à vocation résidentielle essentiellement.

Finalement, la ville de Mulhouse, au centre de l'agglomération, concentre logiquement les vulnérabilités, tant humaines que fonctionnelles, ce dont résulte une vulnérabilité totale plus élevée que pour les communes avoisinantes.

3.2.5 Interactions entre risques sismique et technologiques

L'étude des aléas et des vulnérabilités ne prend son sens qu'à partir du moment où l'on croise ces différentes informations, sous la forme de cartes de risque.

3.2.5.1 Risque sismique

La carte 3.45 ne constitue pas en soi une carte de risque, puisqu'elle ne synthétise pas les données sous la forme d'une unique variable "risque". Elle permet cependant de superposer les données d'amplification avec celles de vulnérabilité physique du bâti. Nous avons identifié une vulnérabilité physique du bâti plus élevée sur les communes de Mulhouse (notamment le centre) et Riedisheim. Ces communes sont caractérisées par des amplifications de niveau 3 et 4 (excepté les secteurs sud de Riedisheim et l'extrême sud-est de Mulhouse, en zone de niveau 1 d'amplification) : le risque sismique est donc particulièrement élevé pour ces deux communes. A l'opposé, les communes localisées au sud-ouest de Mulhouse, comme Morschwiller-le-Bas, montrent des amplifications faibles (niveau 1) et des bâtiments pour lesquels la différence entre la fréquence de site et celle de bâtiment est élevée (entre 2 et 10 Hz).

Parmi les bâtiments de vulnérabilité physique élevée, sept se trouvent sur le site industriel de l'usine Rhodia, en zone d'amplification de niveau 3, et trois correspondent à des bâtiments sources d'accidents industriels, dont un seul est construit aux normes parasismiques. Cette observation souligne d'ores et déjà la potentialité d'effets dominos et une interaction possible entre risque sismique et risques technologiques.

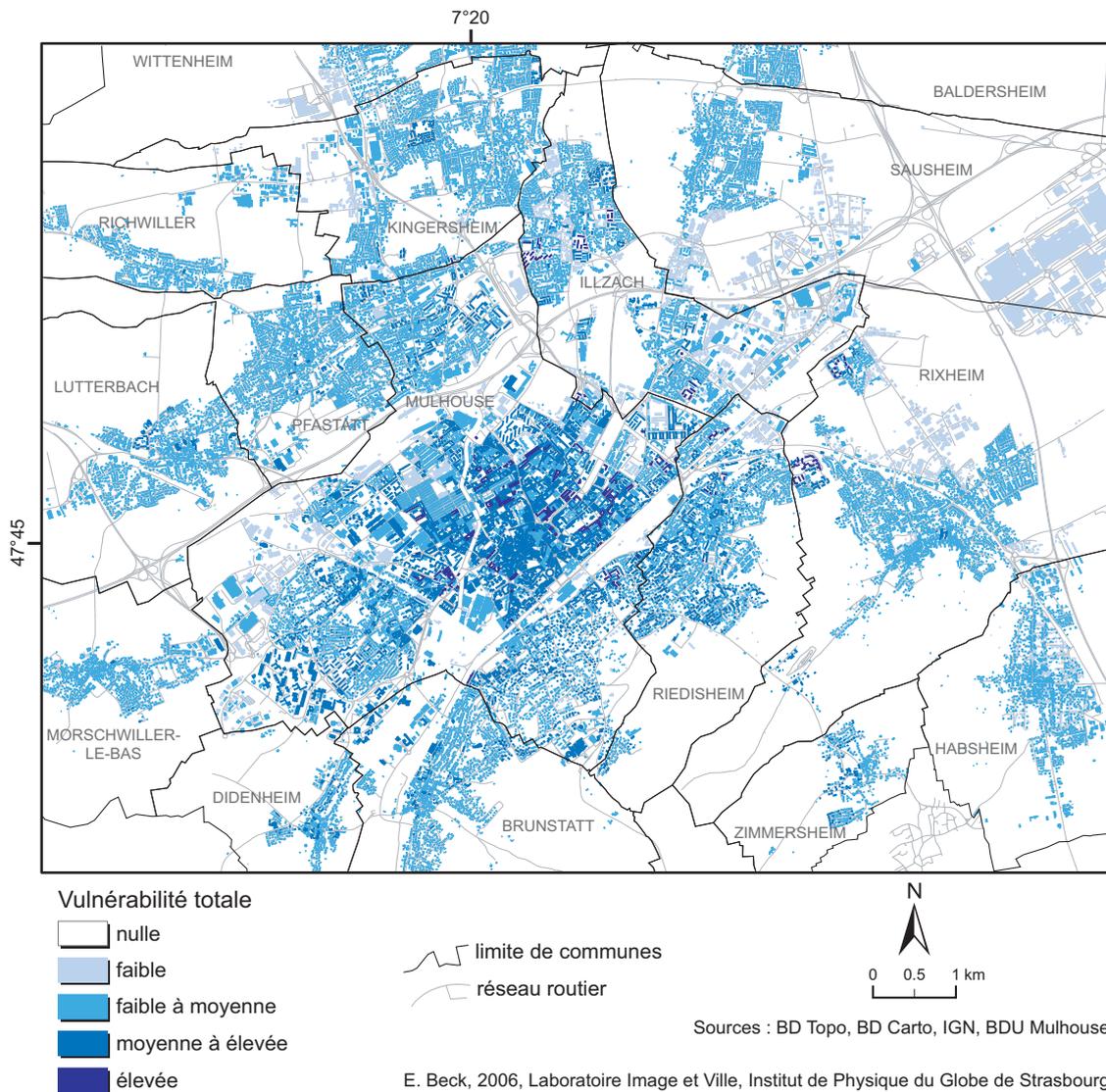


FIG. 3.44 – *Vulnérabilité totale ramenée au bâti de l'agglomération mulhousienne. La vulnérabilité totale tient compte de la vulnérabilité physique, de la vulnérabilité fonctionnelle, de la hauteur de bâtiment et de la densité de population ramenée aux bâtiments. Elle est évaluée à partir d'un indice (équ. 2.11 et § 2.3.4). La ville de Mulhouse apparaît comme moyennement à très vulnérable, par rapport aux autres communes, davantage caractérisées par une vulnérabilité faible à moyenne.*

La carte 3.46 montre que la grande majorité des ERP (60 %) et des bâtiments de vulnérabilité fonctionnelle maximale sont localisés dans la zone d'amplification de niveau 3, étant donné qu'il s'agit de la zone d'effets de site la plus étendue. Notons que l'hôpital Emile Muller et la majorité des bâtiments de l'hôpital du Hasenrain (vulnérabilité moyenne à élevée) sont localisés dans une zone d'amplification minimale, ce qui ne signifie pas une amplification nulle mais plus faible que sur d'autres secteurs comme la clinique Saint-Sauveur (en zone d'amplification 3) ou la mairie, la caserne de pompiers de Mulhouse et la gendarmerie ou encore l'ensemble des sites dotés d'un PPI.

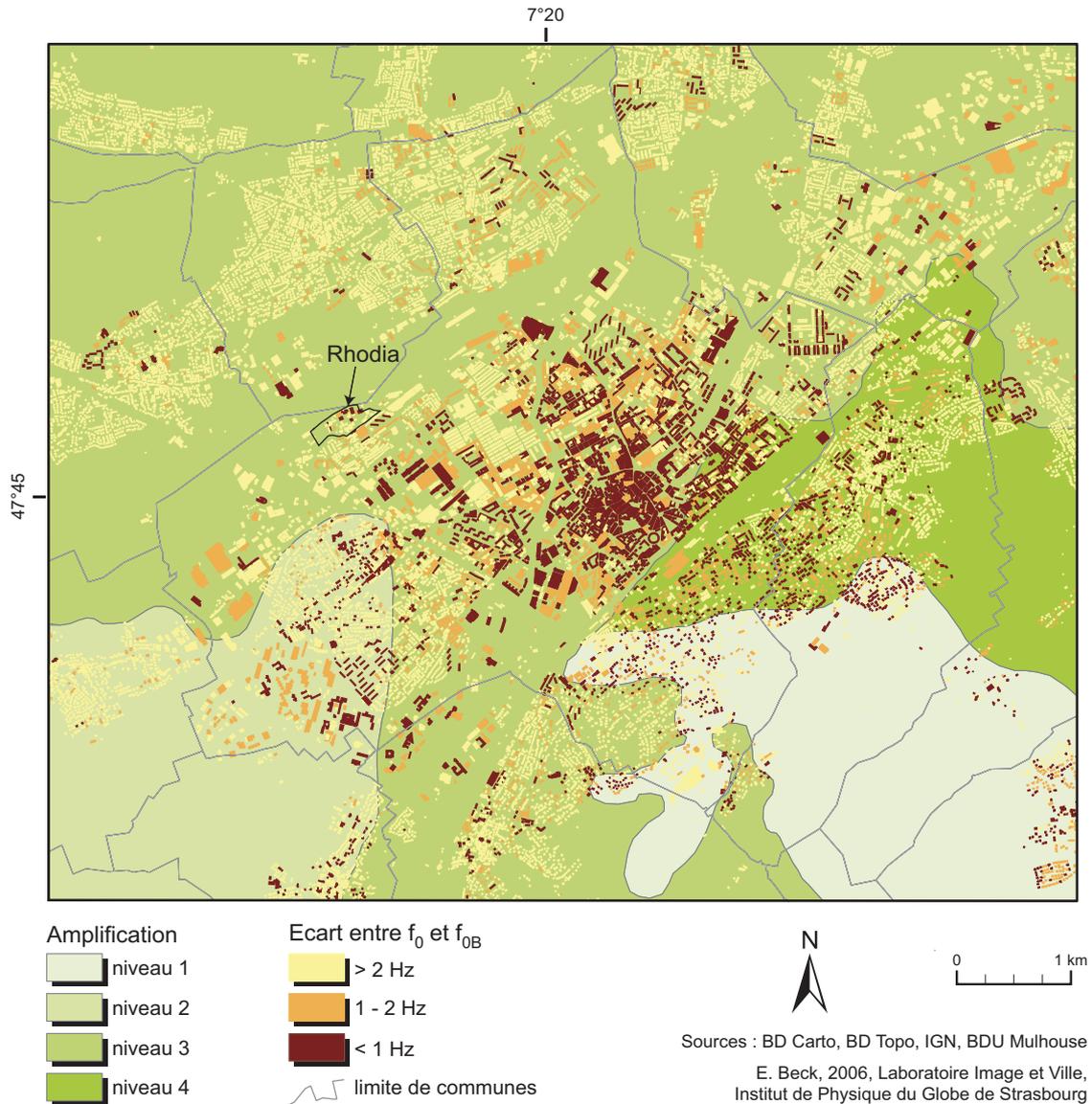


FIG. 3.45 – Carte de croisement entre l'amplification des ondes (déduite des rapports H/V de bruit et des résultats de la méthode des fonctions récepteurs) et la vulnérabilité physique du bâti, obtenue à partir de la hauteur des bâtiments. Un niveau d'amplification 1 indique une amplification plus faible qu'un niveau d'amplification 2, 3 ou 4. Un écart entre f_0 et f_{0B} supérieur à 2 Hz signifie une vulnérabilité physique faible, alors qu'un écart inférieur à 1 Hz correspond à une vulnérabilité physique élevée. Les communes dont les bâtiments sont les plus vulnérables aux séismes (Mulhouse et Riedisheim) sont localisées en zone d'amplification élevée (niveau 3 et 4).

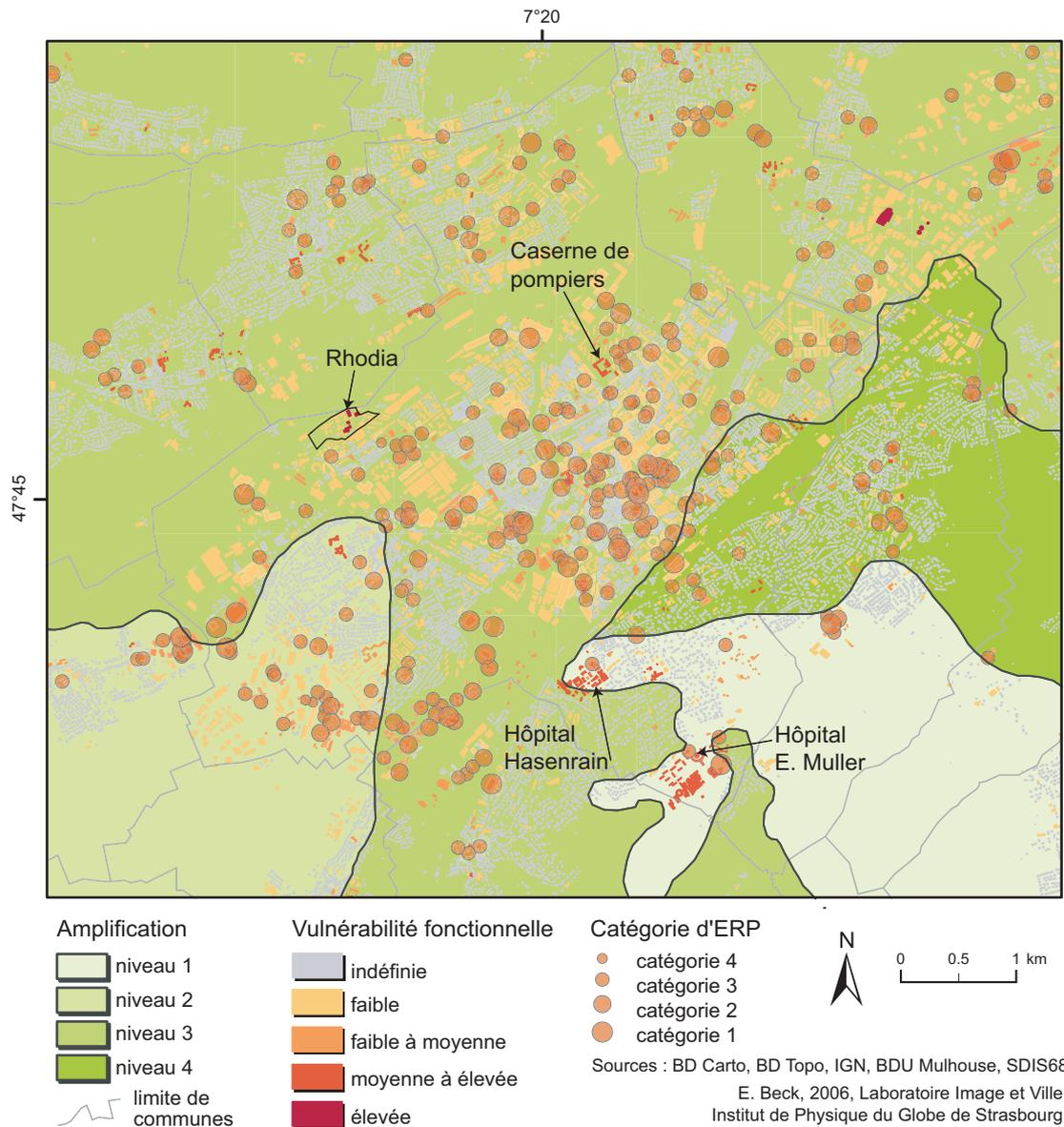


FIG. 3.46 – Carte de croisement entre l'amplification des ondes (déduite des rapports H/V de bruit et des résultats de la méthode des fonctions récepteur) et la vulnérabilité fonctionnelle du bâti. Un niveau d'amplification 1 indique une amplification plus faible qu'un niveau d'amplification 2, 3 ou 4. La majorité des bâtiments de vulnérabilité fonctionnelle maximale et des ERP sont localisés en zone d'amplification de niveau 3.

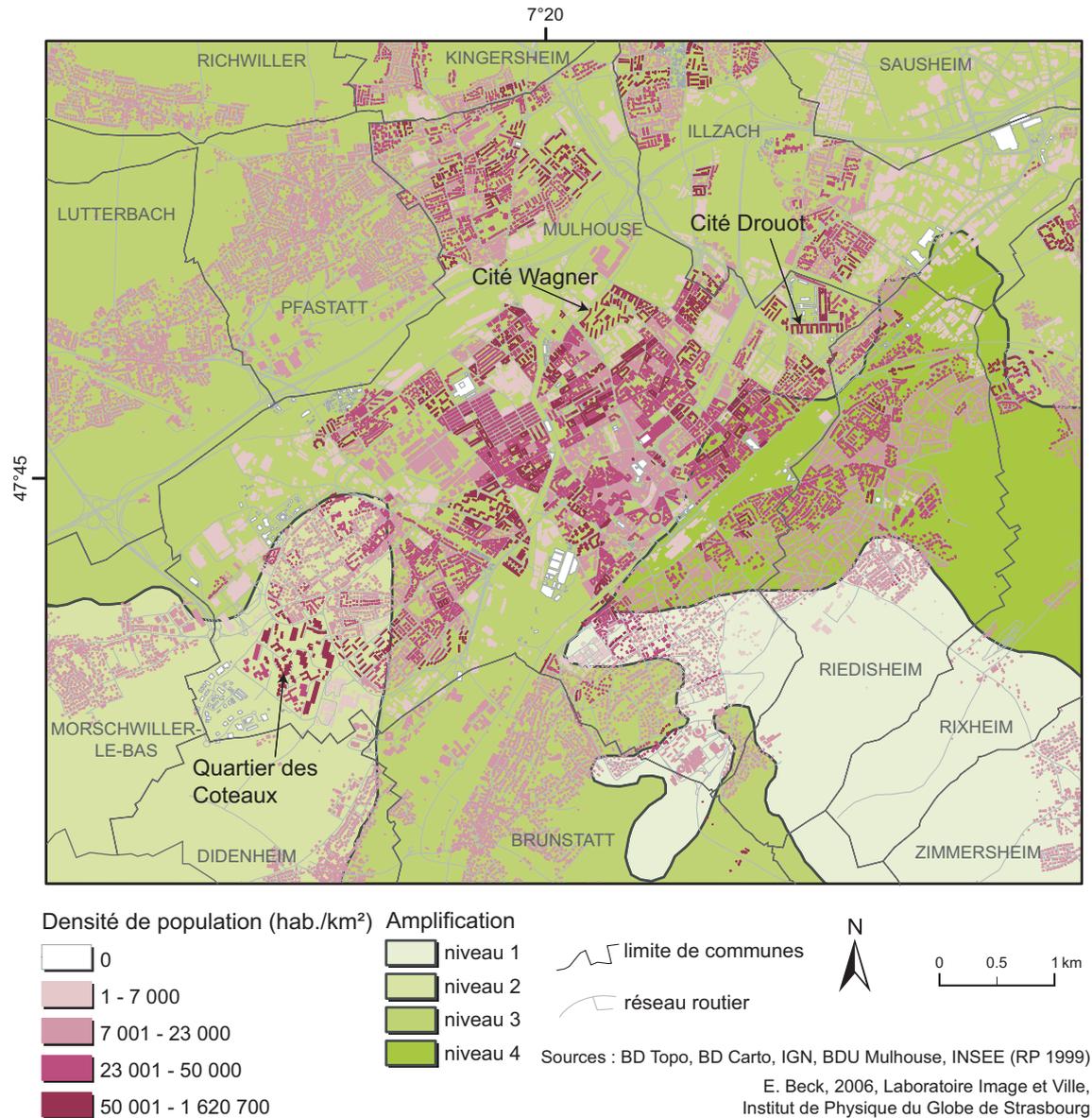


FIG. 3.47 – Carte de croisement entre l'amplification des ondes (déduite des rapports H/V de bruit et des résultats de la méthode des fonctions récepteurs) et la densité de population ramenée à l'espace bâti. Un niveau d'amplification 1 indique une amplification plus faible qu'un niveau d'amplification 2, 3 ou 4. Les secteurs d'amplification plus élevée (niveau 3 et 4) coïncident avec les îlots/IRIS les plus denses.

La vulnérabilité fonctionnelle de la zone d'amplification 4 semble à première vue relativement faible, excepté quelques bâtiments de vulnérabilité moyenne à élevée. Il est cependant difficile de décrire la vulnérabilité fonctionnelle dans les détails puisque, comme vu précédemment, l'attribut "fonction" est peu renseigné dans la BD Topo®. On note par ailleurs que peu d'ERP sont localisés dans la zone d'amplification 4, la majorité étant localisés sur Mulhouse (zone d'amplification 3 principalement).

Enfin, la carte 3.47 superpose les amplifications potentielles et les densités de population ramenées au bâti. Les secteurs d'amplification plus élevée (niveaux 3 et 4) coïncident avec les îlots/IRIS de densité plus élevée, puisque la zone d'amplification 3 recouvre plus de la moitié de la zone d'étude, dont une grande partie de Mulhouse. Les communes d'Illzach, Riedisheim et Sausheim montrent également des densités de population moyennes à élevées et sont caractérisées par les amplifications de niveau 3 et 4. C'est d'ailleurs la commune de Riedisheim qui a le plus à craindre en termes d'amplification, puisque la zone 4 recouvre une grande partie de son territoire communal. Le risque est donc élevé pour ces différents secteurs.

Le quartier des Coteaux⁴⁰ est localisé en zone 2, alors que la cité Drouot et la cité Wagner, qui concentrent une masse importante de population, sont en zone 3, comme la cité de Bourtzwiller, située plus au nord. A l'opposé, le Rebbert, quartier d'habitat bourgeois en majorité individuel, est caractérisé par une amplification de niveau 1 pour une partie et de niveau 3 pour une autre.

L'analyse des données d'amplification et de vulnérabilité du bâti (physique et fonctionnelle) et de population permet d'identifier des secteurs où le risque sismique est élevé : nous retiendrons notamment la commune de Riedisheim, les bâtiments hébergeant les instances dirigeantes mulhousiennes, des sites dotés d'un PPI (site classés Seveso seuil haut et gare de triage), la caserne de pompiers et les quartiers de densité élevée comme les cités Drouot, Wagner ou Bourtzwiller.

3.2.5.2 Risques technologiques

La carte des risques technologiques (fig. 3.48), croisant vulnérabilité totale⁴¹ et aléa technologique, compile l'information et permet d'identifier d'une part les secteurs croisant aléa et vulnérabilité élevés et d'autre part les secteurs de vulnérabilité élevée mais non exposés à un aléa technologique. Cinq niveaux de risque ont été définis : risque nul⁴², faible, faible à moyen, moyen, moyen à élevé et élevé. Le risque élevé correspond à la double localisation d'un aléa élevé et d'une vulnérabilité élevée (bâtiments sources sur les sites industriels dangereux) ; ce sont les seuls secteurs de risque élevé, compte tenu de la clé de détermination que nous avons choisie (cf. § 2.4.2). Le risque moyen à élevé concerne les bâtiments localisés à proximité directe des sites industriels dangereux (autour de Rhodia-Dornach notamment) et les bâtiments localisés à l'intérieur des emprises industrielles mais qui ne constituent pas des points sources d'accidents potentiels (17 bâtiments au total). Le risque moyen concerne

⁴⁰Les différents lieux, quartiers, hôpitaux... sont localisés sur la carte 3.10 et sur l'encart situé à la fin du manuscrit.

⁴¹Vulnérabilité synthétisant les vulnérabilités physique, fonctionnelle (hauteur et fonction principale) et la densité de population, ramenée à l'échelle du bâtiment.

⁴²Le risque est nul à partir du moment où la vulnérabilité ou l'aléa est nul. Sur la carte 3.48, plutôt que de représenter uniquement le risque non-nul (gamme de violets), nous avons figuré l'aléa (gamme de rouges) et la vulnérabilité (gamme de bleus).

principalement la ville de Mulhouse (249 bâtiments sur les 299 pour lesquels le risque est moyen) et Illzach, dans une moindre mesure (37 bâtiments sur 299). Cela provient du fait que le zonage PPI de la gare de triage (rayon de 4 000 m) recouvre largement ces deux communes et que la vulnérabilité est plus élevée dans ces deux communes, notamment en termes de densité de population et de vulnérabilité fonctionnelle.

Fort heureusement, la majorité de la région mulhousienne est caractérisée par un risque technologique faible (la moitié des bâtiments) voire nul (39 %). Au total, moins d'1 % des bâtiments de la région d'étude sont concernés par l'une des trois classes de risque les plus élevées (risque moyen, moyen à élevé, élevé). Cependant, ce 1 % peut être significatif s'il regroupe l'ensemble des bâtiments dont la fonction est importante dans la gestion d'une crise ou s'il s'agit des ERP. C'est pourquoi une analyse de la localisation de ces bâtiments par rapport aux secteurs de risques technologiques est essentielle.

Concernant les établissements d'enseignement, seuls trois bâtiments sont concernés par un niveau de risque moyen (aucun dans les classes de risques plus élevées, la majorité d'entre eux - 53 % - sont caractérisés par un risque faible).

Les services médicaux et les instances dirigeantes sont également peu concernées par les risques technologiques : en effet, on observe une répartition équilibrée entre les bâtiments au risque nul, faible et faible à moyen. Les 34 bâtiments hébergeant les services de maintien de l'ordre sont caractérisés par un risque un peu plus élevé (62 % d'entre eux sont localisés dans des secteurs de risque faible à moyen, aucun dans une classe de risque plus élevée).

Au final, lorsqu'on considère plusieurs niveaux d'aléas à partir du nombre d'enveloppes superposées, le risque résultant du croisement entre l'aléa et la vulnérabilité est relativement faible et les bâtiments les plus sensibles ne sont pas exposés à un risque élevé. Des résultats différents seraient certainement observés si seule l'exposition était considérée, quel que soit le nombre d'enveloppes. Dans ce cas, l'ensemble de l'agglomération serait presque entièrement concernée par un seul et même niveau de risque, en raison de l'extension importante de l'enveloppe de la gare de triage.

La confrontation entre l'aléa réel et celui que se représente la population est une étape importante dans l'appréhension de la culture des risques. La carte 3.49 indique la réponse à la question "vous sentez-vous beaucoup, plus ou moins ou pas du tout exposé au risque industriel, ici ?". L'information géographique a volontairement été très simplifiée, de manière à ce qu'on puisse représenter les individus sans les agréger. Nous supposons que les individus exposés à un aléa se sentent davantage exposés que ceux habitant en dehors d'une zone de danger car la proximité de la source de danger peut accentuer leur sensibilité et ils sont susceptibles de recevoir une information distribuée par les industriels à l'intérieur des PPI. C'est effectivement le cas, puisque 47.1 % des individus interrogés dans une zone d'aléa faible à moyen ⁴³ se sentent très exposés à un risque industriel ⁴⁴ contre 19.0 % des

⁴³ Aucun individu n'a été interrogé dans les zones d'aléa moyen à élevé et d'aléa élevé, qui correspondent aux sites dangereux et à leurs environs immédiats.

⁴⁴ L'aléa tel qu'il est représenté sur la carte 3.49 regroupe l'aléa industriel des sites de Rhodia, EPM et TYM ainsi que l'aléa TMD de la gare de triage. Nous avons volontairement confronté l'aléa **technologique** (et pas uniquement l'aléa industriel) réel avec la représentation cognitive du risque **industriel** étant donné le cas particulier de la gare de triage, qui constitue un site par lequel **transitent** des matières dangereuses mais également un site où sont **stockés** ces produits. Dans ce sens, il peut être considéré comme un site industriel dangereux par la population. Notons par ailleurs que la proportion de la population enquêtée réellement exposée au TMD de la gare (localisée dans son PPI) et s'y sentant exposée est encore plus faible que dans le cas du risque industriel (15 % ont répondu qu'ils s'y sentaient beaucoup exposés, 26 % ont répondu "plus ou moins").

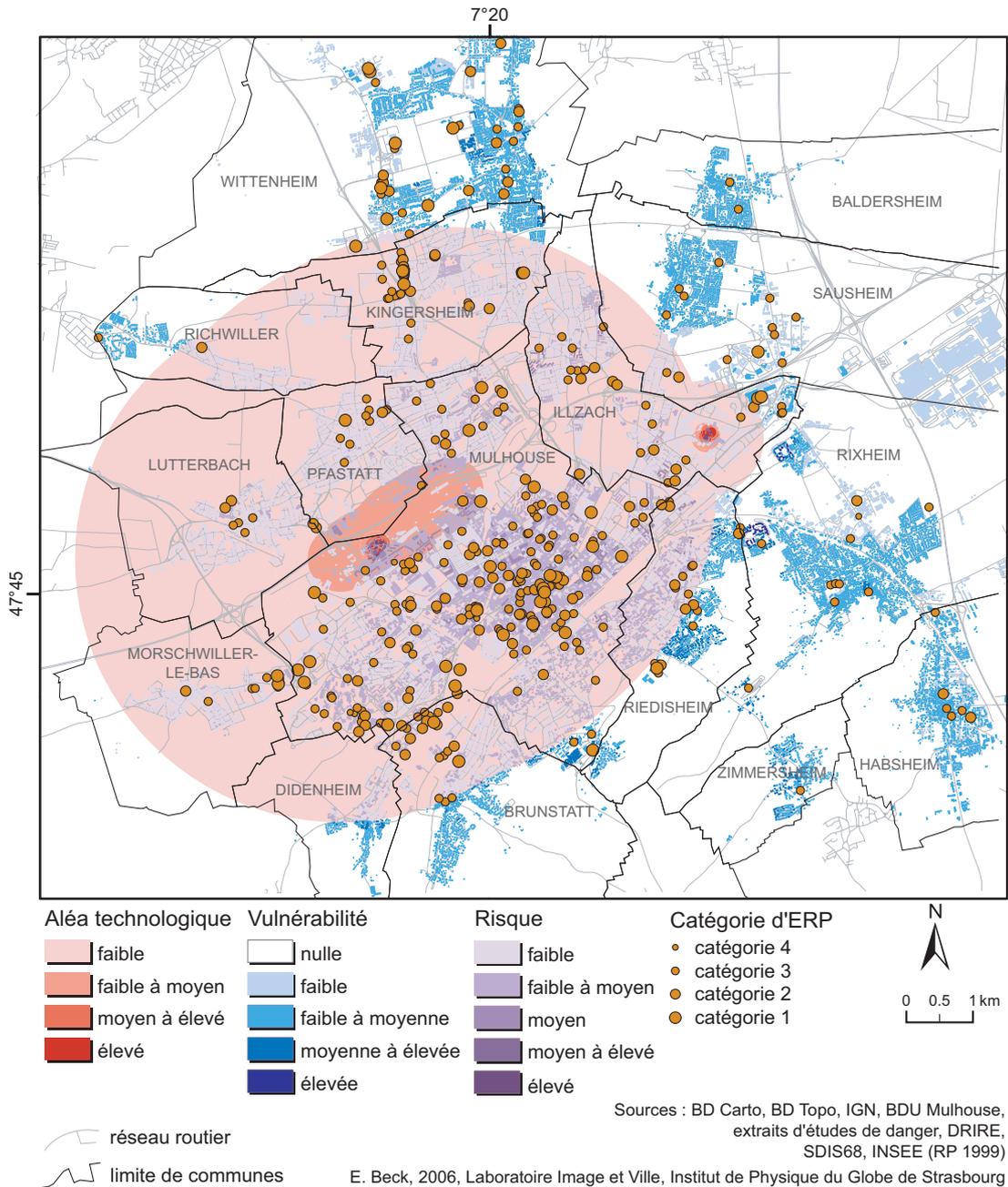


FIG. 3.48 – Risques technologiques sur l'agglomération mulhousienne. La majeure partie de la région d'étude est caractérisée par un risque technologique faible (la moitié) voire nul (39 %).

individus localisés à l'extérieur des PPI (aléa nul). On note cependant un déficit d'information ou de représentation cognitive des risques, puisque 41.2 % des individus localisés dans un espace d'aléa faible à moyen ne se sentent pas du tout exposés au danger industriel (c'est également le cas de 49.9 % des individus résidant ou travaillant dans un espace d'aléa faible), ce qui indique une sous-estimation du risque par la moitié de la population interrogée dans ces quartiers. Le décalage entre le risque "perçu" et l'aléa réel apparaît également dans la zone d'aléa nul, où 19.0 % des enquêtés surestiment le risque industriel (ils s'y sentent très exposés).

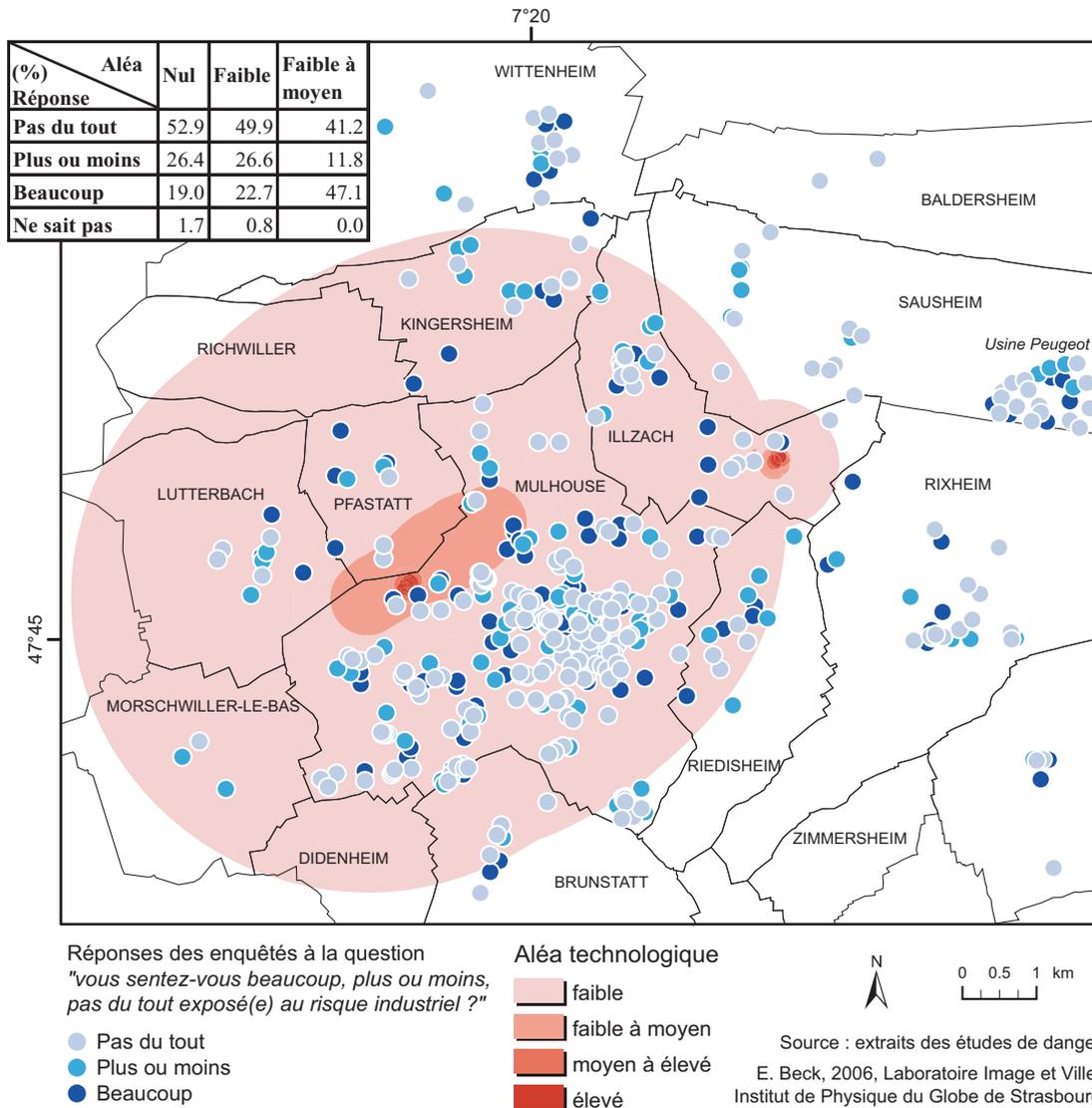


FIG. 3.49 – Aléa technologique réel (déduit de la superposition des enveloppes) et sentiment d'exposition des enquêtés par rapport aux sites industriels dangereux. On observe une influence limitée de la distance à la source de danger sur la représentation cognitive des risques, malgré certains décalages entre celle-ci et la réalité : 47.1 % des personnes interrogées dans la zone d'aléa faible à moyen se sentent très exposées au risque industriel, contre 19.0 % des enquêtés de la zone d'aléa nul. Note : les actifs enquêtés sur le site de Peugeot ont été interrogés en trois lieux différents. Cependant, pour des questions de lisibilité de la carte, ils ont été répartis sur l'ensemble du site de l'usine.

3.2.5.3 Interactions entre risques

Deux catégories d'interactions sont étudiées dans le cadre de cette recherche : d'une part les réactions en chaîne se produisant suite à un séisme, d'autre part les effets dominos susceptibles d'être observés entre plusieurs scénarios d'accidents technologiques. Pour identifier les interactions entre risques sismique et technologiques, nous repérons les bâtiments constituant des points sources d'accidents technologiques par rapport aux zones d'amplification. La vulnérabilité physique de ces bâtiments vis-à-vis des tremblements de terre est également considérée. Dans le cas des interactions entre risques technologiques, nous identifions des effets dominos potentiels en nous focalisant sur une analyse de proximité des enveloppes d'effets redoutés.

– Interactions entre risques sismique et technologiques (prise en compte des 31 scénarios)

La carte 3.51 indique la localisation des sources de danger technologiques (correspondant aux centres des enveloppes de scénarios) et les zones homogènes d'effets de site. On observe que les deux secteurs générateurs de danger technologique sont localisés en zone de niveau 3 d'amplification.

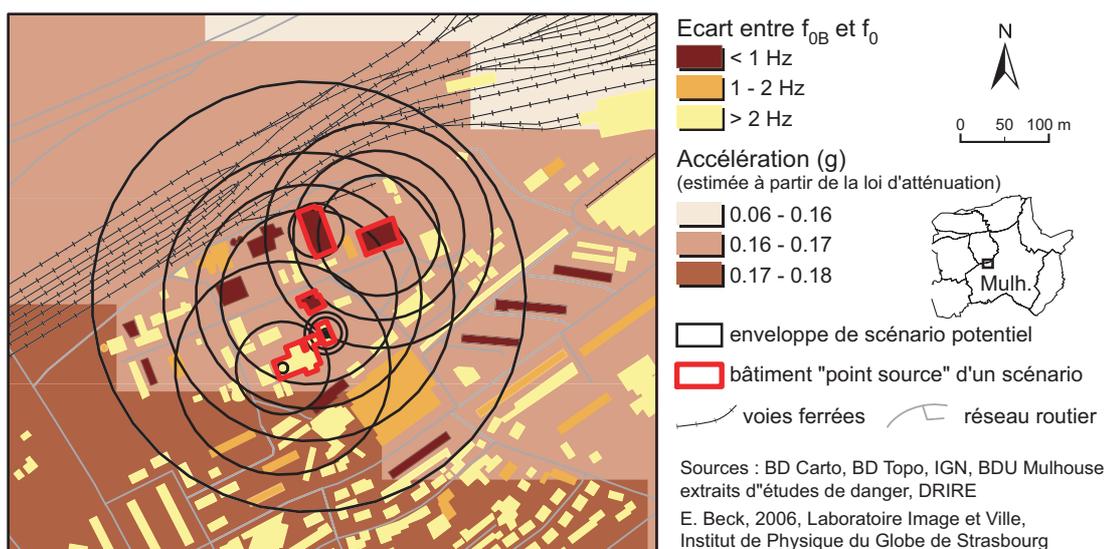


FIG. 3.50 – Interactions entre risques sismique et technologiques sur le site de Rhodia. Trois bâtiments montrent un écart entre leur fréquence fondamentale de bâtiment et la fréquence de site suffisamment faible (< 1 Hz) pour que des réactions en chaîne soit redoutées. Si celles-ci se produisaient, leurs effets seraient confinés à l'intérieur du site industriel.

Dans le secteur des établissements EPM-TYM, aucun bâtiment ne semble à première vue vulnérable aux séismes si l'on considère leur mise en résonance potentielle ($\Delta f_0 \leq 1\text{Hz}$).

L'analyse du secteur de Rhodia en particulier interpelle (fig. 3.50). L'accélération estimée suite à la simulation d'un séisme sur la faille d'Illfurth (premier scénario) est égale à 0.16 g. Trois bâtiments points sources d'accidents industriels montrent un faible écart entre leur fréquence fondamentale et la fréquence fondamentale de site. Parmi ces trois bâtiments, un seul a été construit aux normes parasismiques. Si les bâtiments ne résistent pas à une accélération de 0.16 g, susceptible d'être encore plus élevée puisque le secteur de Rhodia se

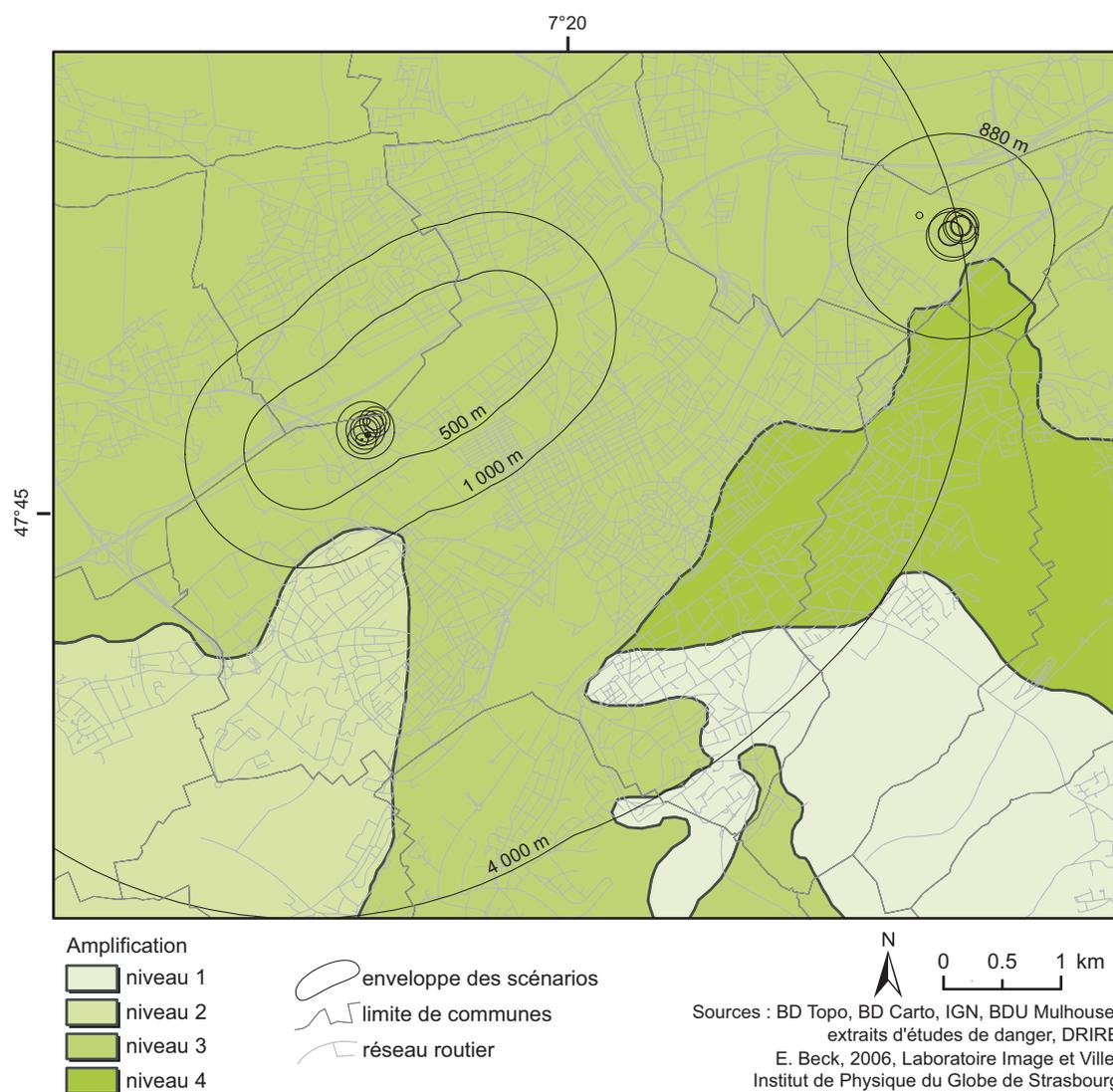


FIG. 3.51 – Amplification et enveloppes de scénarios d'accidents industriels. Les sites industriels dangereux (et en conséquence les points sources des scénarios) sont localisés en zone de niveau 3 d'amplification.

trouve en zone 3 d'amplification, des réactions en chaîne sont à craindre. Les scénarios 5, 6, 7, 18 ont leur point source dans les deux bâtiments non construits aux normes parasismiques (cf. annexe 9). Si des accidents se produisaient, les effets redoutés seraient de type toxique et explosion, avec une extension spatiale maximale correspondant à un cercle de 129 m de rayon (scénario 5 ; cf. annexe 9). Les effets seraient contenus dans l'emprise du site de Rhodia. Cependant, ces diverses observations ne prennent pas en compte les éventuelles réactions en chaîne technologiques, décrites dans le paragraphe suivant.

– **Interactions entre risques technologiques (scénarios initiaux non toxiques ou distance d'effets supérieure à 10 m)**

Les interactions entre scénarios d'accidents technologiques sont récapitulées dans le tableau 3.10. Seules les réactions en chaîne faisant suite à un accident de type incendie (thermique) ou explosion (surpression) ont été prises en compte ⁴⁵. Les scénarios sont décrits en annexe 9. Nous avons analysé les réactions en chaîne de manière très théorique par rapport aux différentes possibilités de contrôle, c'est-à-dire en nous appuyant uniquement sur les informations fournies par les études de danger et sur la localisation des points sources par rapport aux différentes enveloppes (cf. § 2.4.3.2).

Les scénarios 17 (Rhodia) et 29 (Gare du Nord) sont les scénarios susceptibles de générer le plus de réactions en chaîne, si l'on considère uniquement le premier niveau d'effets dominos. En effet, chacun d'entre eux peut être directement à l'origine de 20 réactions en chaîne. Ils sont suivis par le scénario 15 (Rhodia), à partir duquel 14 scénarios peuvent se produire en cas de réaction en chaîne.

La figure 3.52 indique sous forme schématique les potentielles réactions en chaîne des différents scénarios propres à chacun des quatre sites dangereux. Le type d'effets redoutés du scénario (couleur de fond du carré), le site dangereux (couleur de contour du carré) auquel il est rattaché et le type de relation de cause à effet (simple ou double ⁴⁶ ; épaisseur du trait de la flèche) sont représentés.

Deux systèmes indépendants apparaissent nettement : ils correspondent aux deux secteurs Rhodia/gare du Nord (a) et EPM-TYM (b). Ils sont théoriquement indépendants car aucune réaction en chaîne entre des scénarios de ces deux systèmes n'est identifiée.

Le système Rhodia/gare du Nord indique nettement la capacité élevée des scénarios 29, 17 et 15 à provoquer des réactions en chaîne. Les effets redoutés dominants sont de type thermique et toxique, ce qui explique également que le niveau maximal d'effets dominos soit égal à 5 (nous avons considéré que les effets redoutés de type toxique ne pouvaient générer de réaction en chaîne ; cf. § 2.4.3.2) : on peut citer par exemple la chaîne⁴⁷ 15 → 17 → 29 → 12 → 11 → 10. La complexité modérée des réactions en chaîne est compensée par un nombre important d'interactions potentielles, même si la grande majorité d'entre elles sont simples (3 doubles contre 55 relations simples).

Quant au système EPM-TYM, il est caractérisé par une grande complexité car de nombreuses interactions (relations de cause à effet doubles) sont observées (25 relations doubles

⁴⁵ Les effets toxiques sont écartés car nous estimons qu'un effet domino peut survenir si le bâtiment source est endommagé (par un incendie, une explosion, un séisme).

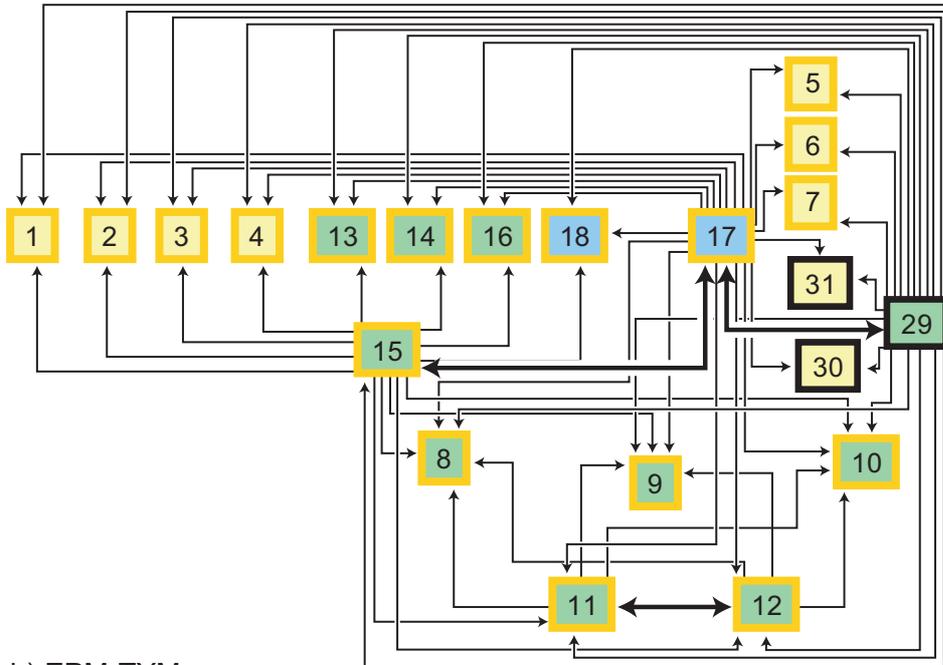
⁴⁶ Une interaction simple, ou réaction en chaîne, correspond à une relation de cause à effet simple entre deux scénarios (1 entraîne 2). Une interaction double, ou interaction, correspond à deux relations de cause à effet entre deux scénarios (1 entraîne 2 et 2 entraîne 1).

⁴⁷ Une flèche signifie "entraîne". Exemple : 1 → 2 signifie "1 entraîne 2", autrement dit que le scénario 1 peut entraîner l'occurrence du scénario 2.

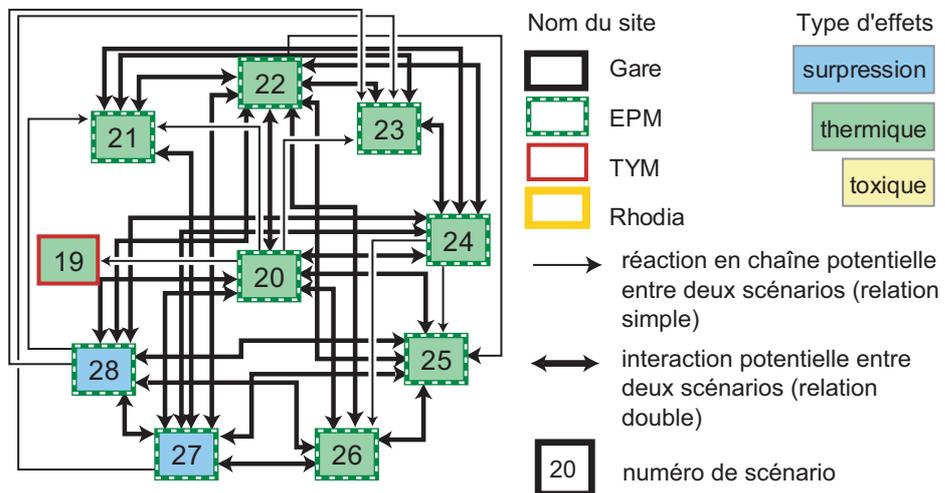
Scénario considéré	Effet redouté	Réactions en chaîne potentielles (numéros des scénarios considérés)	Remarques
1	Toxique		Toxique donc écarté
2	Toxique		Toxique donc écarté
3	Toxique		Toxique donc écarté
4	Toxique		Toxique donc écarté
5	Toxique		Toxique donc écarté
6	Toxique		Toxique donc écarté
7	Toxique		Toxique donc écarté
8	Incendie		Rayon faible donc écarté
9	Incendie		Rayon faible donc écarté
10	Incendie		Rayon faible donc écarté
11	Incendie	8, 9, 10, 12	
12	Incendie	8, 9, 10, 11	
13	Incendie		Rayon faible donc écarté
14	Incendie		Rayon faible donc écarté
15	Incendie	1, 2, 3, 4, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18	
16	Incendie		Rayon faible donc écarté
17	Explosion	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 29, 30, 31	
18	Explosion	Aucune réaction en chaîne potentielle	
19	Incendie	Aucune réaction en chaîne potentielle	
20	Incendie	19, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28,	
21	Incendie	22, 23, 24, 27	
22	Incendie	20, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 28	
23	Incendie	21, 22, 24	
24	Incendie	20, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 28	
25	Incendie	20, 26, 27, 28	
26	Incendie	20, 25, 27, 28	
27	Explosion	20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 28	
28	Explosion	20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27	
29	Incendie	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 30, 31	
30	Toxique		Toxique donc écarté
31	Toxique		Toxique donc écarté

TAB. 3.10 – Récapitulatif des réactions en chaîne potentielles entre scénarios d'accidents technologiques. Les scénarios sont décrits en annexe 9. Les réactions en chaîne susceptibles de se produire sont identifiées par analyse spatiale (analyse du contenu des enveloppes, en termes de points sources ; cf. § 2.4.3.2). Les scénarios dont la distance rayon d'effets est inférieure à 10 m sont écartés, tout comme les effets toxiques car nous estimons qu'un effet domino peut survenir si le bâtiment source est endommagé (par un incendie, une explosion, un séisme).

a) Rhodia-gare du Nord



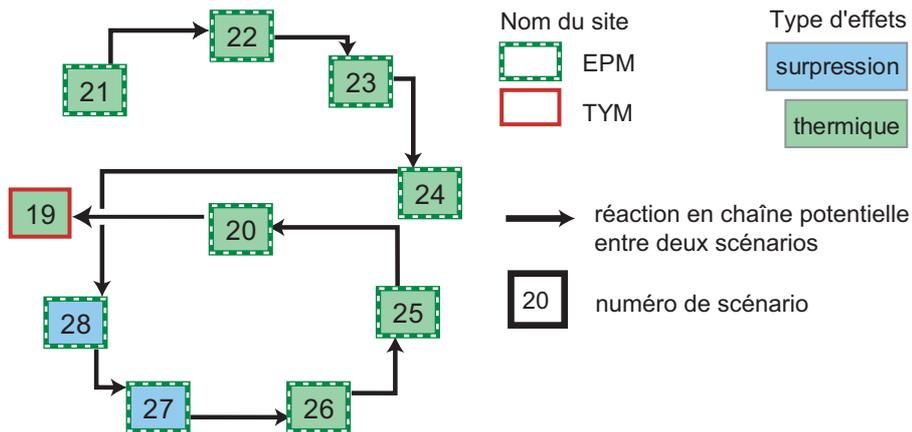
b) EPM-TYM



E. Beck, 2006, Laboratoire Image et Ville, Institut de Physique du Globe de Strasbourg

FIG. 3.52 – Schéma des réactions en chaîne potentielles entre scénarios d'accidents technologiques sur les deux secteurs Rhodia-gare du Nord et EPM-TYM, qui constituent deux systèmes indépendants. Au total, 104 interactions entre les 31 scénarios sont identifiées.

contre neuf relations simples). Le niveau maximal d'effets dominos est de 9, ce qui signifie que, si l'un des scénarios se produit, l'ensemble des autres accidents sont susceptibles de survenir : c'est notamment le cas pour la chaîne $21 \rightarrow 22 \rightarrow 23 \rightarrow 24 \rightarrow 28 \rightarrow 26 \rightarrow 25 \rightarrow 20 \rightarrow 19$ (la figure 3.53 illustre la manière dont il faut lire ce schéma ⁴⁸). L'ensemble des scénarios ne peut être à l'origine d'une telle chaîne : exemple, si le scénario 19 se produit, aucune réaction en chaîne n'est *a priori* susceptible d'advenir. Parmi les différents types d'effets redoutés, on note la prédominance des effets de type thermique.



E. Beck, 2006, Laboratoire Image et Ville, Institut de Physique du Globe de Strasbourg

FIG. 3.53 – Effets dominos potentiels en cas d'occurrence du scénario 21. Si ce scénario venait à se produire, neuf réactions en chaîne pourraient être observées.

Ce type de schéma est encore assez complexe, des améliorations sont nécessaires pour en simplifier la lecture : nous pensons notamment à la cartographie dynamique, qui permettrait de représenter la dimension spatio-temporelle de ce schéma.

3.2.6 Gestion des risques dans l'agglomération de Mulhouse

A présent que les interactions entre risques sismique et technologiques ont été identifiées, il est nécessaire d'en dégager quelques enseignements en termes de gestion des risques dans l'agglomération de Mulhouse.

En cas de séisme, l'étude des effets de site montre une amplification des ondes à la fréquence de résonance, en particulier dans le nord de Riedisheim et dans l'est de Mulhouse. Ainsi, à la fréquence de résonance du site, des accélérations supérieures (facteurs d'amplification variant entre 3.08 et 10.97) à celles calculées par la loi d'atténuation retenue [Ambraseys *et al.*, 1996] sont à craindre. La prise en compte des effets de site dans la construction de nouveaux bâtiments ou la réhabilitation du bâti ancien semble nécessaire dans ce secteur.

Les secteurs voisins de l'usine Rhodia et des établissements EPM-TYM demeurent les secteurs les plus exposés à l'aléa technologique. Des modifications en termes d'aménagement pourraient être envisagées : nous constatons la présence de quelques ERP en zone d'aléa faible à moyen, y compris des ERP de catégorie 1 (de capacité d'accueil supérieure à 1 500

⁴⁸Cet exemple ne prend en compte que les réactions en chaîne simples. L'objectif est de montrer comment une chaîne complète, du scénario n°21 au n°19, peut se produire.

personnes). Une réflexion quant à la présence de ces établissements dans des espaces exposés à l'aléa technologique doit être menée. Il n'est bien entendu pas possible d'éliminer toutes les constructions présentes dans ces secteurs plus sensibles, mais des mesures pour réduire la vulnérabilité du bâti peuvent être entreprises. L'extension spatiale du PPI de la gare de triage interpelle puisqu'il englobe une très grande partie de la région d'étude. En cas d'accident impliquant un wagon de chlore, la caserne de pompiers, la mairie, de nombreux ERP... se trouveraient dans la zone d'extension des effets toxiques, ce qui risquerait de générer des dysfonctionnements de la gestion de crise. Tout comme il existe des modes de construction permettant aux bâtiments de résister aux séismes, des normes de construction visant à favoriser la résistance à une explosion ou un incendie, des systèmes limitant les effets d'un accident toxique, pourraient être appliquées aux bâtiments des secteurs d'aléa technologique moyen (surtout les bâtiments de vulnérabilité moyenne à élevée ou les ERP).

Nous avons identifié des interactions potentielles entre risques sismique et technologiques dans le secteur de l'usine Rhodia en raison de la vulnérabilité physique de certains bâtiments. D'autres bâtiments (hébergeant les services médicaux et/ou les instances dirigeantes) ont montré la même vulnérabilité en raison d'un faible écart entre leur fréquence fondamentale et la fréquence de site. Compte tenu des réactions en chaîne identifiées, il sera nécessaire d'une part de vérifier que ces bâtiments sont construits aux normes parasismiques, d'autre part de faire des études plus poussées, de calculer avec davantage de précision leur fréquence fondamentale et, si la vulnérabilité physique des bâtiments est avérée, de renforcer la structure pour qu'elle résiste ou de modifier sa fonction (réflexion sur l'utilisation du sol et du bâtiment).

Quant aux interactions entre risques technologiques, il convient de les analyser à l'échelle du site car des informations supplémentaires (présence de barrières naturelles ou artificielles, caractéristiques et quantité de substances toxiques...) permettraient d'écarter certaines réactions en chaîne. L'inventaire des interactions potentielles, déterminées en ne tenant compte que de la dimension surfacique (extension spatiale en 2D des effets et localisation des points sources), impose de mettre en place des systèmes de protection afin d'éviter toute réalisation de ces effets dominos. Les scénarios 17 (usine Rhodia) et 29 (gare du Nord) sont ceux qui généreraient le maximum de réactions en chaîne de manière directe (20 scénarios).

Nous n'avons pas abordé la problématique des réseaux. Retenons simplement que l'hôpital Emile Muller, qui constitue le centre hospitalier principal de la région, est localisé dans le sud-est de Mulhouse. Il est localisé sur la rive est du canal du Rhône au Rhin qui, adossé à la voie ferrée, constitue une "frontière" entre la ville de Mulhouse et le quartier du Rebbert ainsi qu'avec le nord de Riedisheim. La liaison entre la rive ouest et la rive est de cet ensemble canal-voie ferrée s'effectue par l'intermédiaire de plusieurs ponts : en cas de crise, s'ils ont résisté au tremblement de terre, on peut craindre un encombrement de ces ponts, en raison d'une circulation importante née de mouvements de panique ou d'une apathie de la part des personnes choquées. L'hôpital se trouverait isolé du reste de la commune car les services de secours ne pourraient assurer la liaison entre les victimes et les centres de soins. Ajoutons que l'hôpital du Hasenrain, le deuxième centre hospitalier de la région, se trouve dans la même situation que l'hôpital Emile Muller. La mise en place d'un hôpital de campagne s'avérerait nécessaire.

Les espaces non bâtis sont peu nombreux dans la ville de Mulhouse, cependant il convient d'intégrer les résultats de cette étude dans les projets de réhabilitation de bâtiments anciens

(bâtiments industriels ou caserne militaire désaffectés. . .). Par exemple, la prise en compte des fréquences de site dans la construction de nouveaux bâtiments ou la réhabilitation d'anciens peut éviter tout effet négatif en cas de concordance entre celle-ci et la fréquence fondamentale du bâtiment.

Concernant l'acculturation au risque, il est nécessaire de mettre en place des campagnes d'information mieux ciblées, de distribuer des plaquettes de manière nominative, de concentrer des actions dans une période de temps réduite de façon à marquer les esprits et éviter toute banalisation du risque. Le manque évident d'appropriation du risque tel qu'il ressort de l'enquête de représentation cognitive, qui provient visiblement d'une méconnaissance de la localisation du risque, met en avant le besoin de diffusion de documents cartographiques simples, compréhensibles par tous. La sensibilisation des jeunes dès l'école primaire (voire maternelle) apparaît comme une priorité pour faire naître en eux une réelle culture du risque par l'éducation.

Conclusion générale et perspectives

Ce travail de thèse montre l'intérêt des méthodes intégrées multi-risques en système urbain, c'est-à-dire prenant en compte les composantes aléa et vulnérabilité du risque et considérant les éventuelles interactions entre risques de nature différente. Dans notre cas, cette étude s'est attachée à analyser les interactions entre un risque naturel (sismique) et un risque d'origine anthropique (technologique) dans l'agglomération de Mulhouse.

La démarche proposée dans le cadre de ce travail évalue dans un premier temps les différentes composantes des risques, à savoir les aléas et les vulnérabilités.

L'évaluation de l'aléa sismique est basée sur l'étude de la sismicité régionale et de la localisation des failles actives. La variabilité spatiale des effets d'un tremblement de terre a été considérée par le biais de l'étude des effets de site. Pour cela, nous avons utilisé deux méthodes adaptées aux contextes tectonique et géologique de la région d'étude, la méthode de Nakamura (rapports H/V de bruit sismique) et celle des fonctions récepteurs (rapports H/V de sismogrammes). Les résultats sont une carte interpolée des fréquences fondamentales de site et une carte de secteurs géographiques caractérisés par une amplification homogène des ondes sismiques.

L'étude de l'aléa technologique prend en compte deux types de cumul : le cumul quantitatif, qui correspond à une superposition des enveloppes (extension spatiale des effets) des scénarios d'une ou plusieurs entreprises ; le cumul qualitatif, qui vise à caractériser les types d'effets redoutés (thermique, toxique, de surpression) auxquels un individu ou un bâtiment est exposé. L'effet de distance est également intégré pour les effets de type thermique et de surpression, par l'intermédiaire de lois d'atténuation. Il permet de représenter la diminution des effets lorsque l'on s'éloigne de la source de l'accident.

Deux catégories d'éléments exposés sont considérées dans ce travail : les bâtiments et la population. Nous avons tout d'abord souhaité évaluer la vulnérabilité physique du bâti par la mesure de l'écart entre la fréquence fondamentale de bâtiment et la fréquence fondamentale de site, afin d'essayer d'identifier les bâtiments susceptibles d'entrer en résonance en cas de séisme. Puis, nous avons caractérisé leur vulnérabilité fonctionnelle à partir d'un certain nombre de critères (fonction, ERP, type de population accueillie, hauteur). La vulnérabilité de la population est abordée par l'intermédiaire de deux approches : l'une, quantitative, qui considère les densités de population calculées non pas à partir de la surface totale de l'unité de recensement, mais uniquement à partir de la surface bâtie ; l'autre, qualitative, basée sur l'étude de la représentation cognitive des risques par les résidents et les actifs au moyen d'une enquête par questionnaire. Cette dernière approche permet la construction de deux indices de vulnérabilité de la population (l'un pour l'aléa sismique, l'autre pour l'aléa technologique). La vulnérabilité totale est finalement considérée par le biais d'un indice

synthétique qui prend en compte les vulnérabilités physique et fonctionnelle, la hauteur du bâtiment et la densité de population.

L'ensemble des données collectées et créées est intégré dans un système d'information géographique, qui offre des fonctionnalités intéressantes pour la problématique des risques, notamment en tant qu'outil d'aide à la décision. Les risques résultant de la combinaison entre aléa et vulnérabilité ainsi que leurs interactions sont étudiés grâce à des analyses de proximité et des combinaisons et croisements de couches dans le SIG.

Dans un second temps, la simulation d'un séisme de magnitude 6.0 permet de prendre en considération les interactions entre risques et d'identifier les effets dominos potentiels. L'accélération maximale des ondes sismiques est estimée en tout point à partir de la loi d'atténuation de Ambraseys *et al.* [Ambraseys *et al.*, 1996]. L'analyse des interactions entre risques sismique et technologiques est basée sur l'idée que des réactions en chaîne sont observées à partir du moment où un bâtiment constituant un point de départ d'accident technologique (appelé "point source") ne résiste pas à un séisme, notamment parce qu'il s'effondre. L'analyse des interactions entre risques technologiques - autrement dit des effets dominos susceptibles de se produire sur un site technologique ou entre plusieurs sites - est basée sur l'analyse spatiale de proximité, qui consiste à identifier pour chaque scénario d'accident technologique les points sources localisés à l'intérieur de son enveloppe.

La démarche ainsi proposée a été appliquée à l'agglomération de Mulhouse (Haut-Rhin), exposée à sept aléas différents. Elle constitue également une région "vulnérable", entre autres en raison de son importante population et de sa situation dans un bassin économique tri-national.

Concernant le risque sismique, l'étude des effets de site révèle un gradient de fréquences du nord-ouest (0.8-1.5 Hz) vers le sud-est (4-8 Hz). Les amplifications, obtenues par la méthode de Nakamura, sont caractérisées par une variabilité spatiale importante mais avec des valeurs moyennes autour de 3-4, ce qui indique que toute la zone est caractérisée par des effets de site et des effets potentiels d'amplification des ondes sismiques. Par ailleurs, les valeurs d'amplification issues du traitement des enregistrements de séismes par un réseau temporaire de quinze stations sont quasiment égales à celles issues de la méthode de Nakamura pour 40 % d'entre elles. Nous avons également mis en évidence la stabilité temporelle des rapports spectraux de bruit en fréquence et en amplification. Une partition de la région étudiée aboutit à la création de quatre zones homogènes d'effets de site. La principale difficulté de cette étape réside dans l'intégration des effets de site dans la simulation du séisme.

Nous avons simulé deux séismes, l'un sur la faille d'Ilfurth, pour prendre en compte un scénario pénalisant pour la ville de Mulhouse, l'autre sur la faille d'Allschwil, localisée à proximité de Bâle. Dans le cas du premier scénario, les accélérations atteignent des valeurs comprises entre 0.11 et 0.25 g dans la zone d'étude, contre 0.06 à 0.11 g dans le cas du second scénario. Cependant, ces valeurs ne tiennent pas compte de l'amplification potentielle des ondes à la fréquence fondamentale du site : on peut s'attendre à observer des valeurs plus élevées.

L'aléa technologique est très logiquement maximal à proximité des sites dangereux : on observe jusqu'à 14 enveloppes superposées à l'intérieur des sites dangereux ; il reste cependant six enveloppes superposées hors-sites. Si l'on observe uniquement l'exposition non cumulée, quasiment la moitié de l'agglomération est concernée par un accident potentiel,

en raison de l'étendue du PPI autour de la gare du Nord (rayon de 4 km autour de l'emprise ferroviaire).

Les vulnérabilités fonctionnelle et totale sont maximales dans la région de Mulhouse, qui concentre la plus grande partie de la population, des ERP et des activités économiques. Les densités de population les plus élevées sont rencontrées dans les centres des différentes communes et dans certains quartiers populaires.

La population semble peu consciente des dangers auxquels elle est exposée, bien qu'elle ait connaissance des aléas locaux. Une enquête menée auprès d'un échantillon de près de 500 personnes a permis de constater la méconnaissance des consignes de sécurité à suivre en cas de catastrophe. La cartographie de l'indice de vulnérabilité face à l'aléa industriel montre une corrélation entre la distance à la source de danger (sous-entendu la localisation à l'intérieur ou à l'extérieur d'un PPI) et la représentation cognitive de cet aléa. En effet, d'après cette carte, les personnes dont le lieu d'habitation ou de travail est localisé à l'intérieur d'un PPI sont plus vulnérables du fait qu'elles sous-estiment cet aléa. Cette logique spatiale n'est pas observée lorsqu'on cartographie l'indice de vulnérabilité face aux séismes. Ces résultats posent la question de l'efficacité des campagnes d'information autour des sites industriels dangereux.

Des interactions potentielles entre risques sismique et technologiques sont observées sur le site de Rhodia-Dornach en raison de la vulnérabilité physique élevée de trois bâtiments correspondant à des points sources d'accidents technologiques. Parmi ces trois points sources, l'un des bâtiments est connu pour être construit aux normes parasismiques. Les deux autres bâtiments correspondent aux points sources de quatre scénarios différents, dont les effets ne dépasseraient pas l'emprise du site industriel en question. Ces résultats doivent cependant être validés par une étude plus poussée de la fréquence de résonance des bâtiments. Par contre, sur le site EPM-TYM, aucun bâtiment n'est caractérisé par un potentiel d'entrée en résonance ; aucune interaction entre risque sismique et technologiques n'est *a priori* à craindre dans ce secteur.

A l'inverse, les interactions entre risques technologiques sont particulièrement complexes sur le site EPM-TYM, où de nombreuses réactions en chaîne peuvent se produire (jusqu'à dix scénarios différents sont susceptibles de s'enchaîner en raison de la proximité des points sources et de la taille des enveloppes d'effets redoutés). Les effets dominos sont moins complexes sur le secteur Rhodia-gare du Nord (au maximum six scénarios peuvent se succéder) mais plus nombreux (61 réactions en chaîne potentielles contre 43 pour le secteur EPM-TYM).

Les résultats de cette étude pourront, à terme, être intégrés dans le plan local d'urbanisme des différentes communes ou dans le schéma d'aménagement régional, de manière à tenir compte des risques et de leurs interactions potentielles. Cela se traduit par exemple par une prise en compte des effets de site (fréquence fondamentale du sol et amplification) dans la construction en modifiant la structure d'un bâtiment, c'est-à-dire en le rigidifiant (pour augmenter sa fréquence propre) ou au contraire en l'assouplissant. Concernant l'aménagement urbain, une modification de l'utilisation du sol dans les secteurs d'amplification très élevée ou d'aléa technologique important peut être envisagée, que ce soit pour du bâtiment existant ou pour les aménagements futurs. C'est notamment le cas des nombreux ERP localisés à l'intérieur du PPI de la gare de triage. Les interactions potentielles entre risques (sismique/technologiques ou entre risques technologiques) identifiées dans le cadre de cette recherche pourront être intégrées au plan communal de gestion d'une catastrophe (MO-CAMU). Cependant, toute intégration de ces résultats à des fins gestionnaires doit fait

l'objet d'une certaine précaution par rapport aux hypothèses fortes et aux simplifications sur lesquelles ils reposent. Enfin, les résultats des enquêtes pourront également être pris en compte dans la mise en place des campagnes d'information sur les risques, notamment à l'intérieur des PPI (distribution d'une plaquette d'information adressée nominativement, qui, par exemple, comprendrait une carte de l'extension des PPI et insisterait sur les consignes de sécurité à suivre).

Finalement, cette analyse à l'échelle de l'agglomération possède l'avantage de donner une vision d'ensemble des risques, bien qu'elle s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses et de simplifications : on peut citer par exemple la formule utilisée pour calculer la fréquence fondamentale de bâti, les lois d'atténuation des effets d'un accident industriel, qui sont très simplifiées, ou le fait de n'avoir pas intégré les effets barrières dans l'analyse des interactions entre risques technologiques. Un certain nombre de perspectives de travail se dégagent.

Tout d'abord, l'étude des effets de site doit être complétée : il est important de procéder à des mesures de bruit dans le secteur du Reberg et selon un maillage plus fin pour comprendre l'origine de la variabilité spatiale des fréquences fondamentales. Il est tout aussi important de procéder à des mesures SASW pour établir un modèle des vitesses d'ondes S du sous-sol. Les valeurs d'amplification appliquées aux zones homogènes d'effets de site doivent être validées par une campagne d'enregistrements de séismes plus longue et avec davantage de stations. Une réflexion sur la manière d'intégrer les résultats de la sectorisation en zones homogènes d'effets de site dans la simulation d'un séisme doit également être menée.

Les résultats obtenus à la suite de ce travail font l'objet d'incertitudes et d'imprécisions non négligeables, étant donné l'échelle de l'étude. La principale imprécision porte sur l'estimation des fréquences fondamentales des bâtiments. Une étude approfondie de ces fréquences serait nécessaire pour permettre de valider les résultats de nos travaux, y compris ceux portant sur l'analyse des interactions entre risques sismique et technologiques. Une autre imprécision provient du peu de données portant sur le bâti (la fonction est connue pour à peine 12 % des bâtiments) : enrichir la table attributaire permettrait d'améliorer la précision de la vulnérabilité fonctionnelle et donc de la vulnérabilité totale.

Cette étude n'a pris en compte que deux types de risques. Or, cette région est exposée à sept aléas différents. Une perspective intéressante consisterait à élargir le champ d'investigation à ceux-ci (inondations, TMD, rupture d'un barrage...) et à analyser l'ensemble des interactions entre ces risques. Enfin, la possibilité de transférer la méthodologie proposée dans le cadre de cette thèse pourrait être vérifiée par son application à d'autres agglomérations comparables d'un point de vue de la taille et des aléas (sismique et technologiques).

Bibliographie

- [Adger, 2000] N.W. Adger. Social and ecological resilience : are they related ? *Progress in Human Geography*, 24(3) : 347–367, 2000.
- [AFNOR, 1995] AFNOR. *Règles de construction parasismique. Règles PS applicables aux bâtiments, dites Règles PS 92. NF P 06-013*. Association Française de Normalisation (AFNOR), 1995.
- [Aki, 1993] K. Aki. *Local site effects on weak and strong ground motion*, volume 218, pages 93–111. 1993.
- [Akyol *et al.*, 2002] N. Akyol, A. Aybuge, et H. Eyidogan. Site amplification of S-waves in Bursa City and its vicinity, Northwestern Turkey : comparison of different approaches. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22 : 579–587, 2002.
- [Alexandrian et Tran, 2005] D. Alexandrian et P. Tran. *Cartographie dynamique des feux de forêt dans le département du Var - France*, pages 67–70. ISTED, 2005.
- [Ambraseys *et al.*, 1996] N.N. Ambraseys, K.A. Simpson, et J.J. Bommer. Prediction of horizontal response spectra in Europe. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25 : 371–400, 1996.
- [André, 2004] G. André. Cartographie du risque naturel dans le monde. Etude comparative entre une approche d'ordre social et une approche d'ordre économique de la vulnérabilité. *Cybergéo*, (286), 2004.
- [Appleton *et al.*, 2005] S. Appleton, N. Maginot, et M. Leobet. *Publication des risques majeurs sur Internet - France*, pages 9–12. ISTED, 2005.
- [Arnal et Martin, 1999] C. Arnal et R. Martin. Projet GEMITIS Nice - Evaluation des dommages directs d'un séisme sur la ville de Nice, scénarios de risque. Extension des résultats au département des Alpes Maritimes. Rap. BRGM R40612, BRGM, 1999. 173 p.
- [Atakan *et al.*, 1997] K. Atakan, B. Bransdottir, P. Halldorsson, et G.O. Fridleifsson. Site response as a function of near-surface geology in the South Iceland seismic zone. *Natural Hazards*, 15 : 139–164, 1997.
- [Barczak et Grivault, 2005] A. Barczak et C. Grivault. Risques urbains en interaction : une méthode d'évaluation. L'exemple de Longvic, une commune du sud-est dijonnais. Dans *Actes du colloque SAGEO, Avignon, 20-23 juin 2005*, éditeurs Josselin D. et Libourel T., 2005. poster.
- [Bard *et al.*, 1997] P.-Y. Bard, A.-M. Duval, B. Le Brun, C. Lachet, J. Riepl, et D. Hatzfeld. Reliability of the H/V technique for site effects measurement : an experimental assessment. Dans *Proceedings of the Seventh International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Istanbul, July 19-24, 1997*.

- [Bard, 1999] P.-Y. Bard. Microtremor measurements : a tool for site effect estimation ? Dans *Proc. of 2nd International Symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion, Yokohama, Japan, 1-3 December 1998*, éditeurs Okada Irikura, Kudo et Sasatani, volume 3, pages 1251–1279, 1999.
- [Bartélémy, 1998] J.-R. Bartélémy. La prévention du risque d'inondation aux Pays-Bas. *2001 Plus*, 46, 1998.
- [Bauer *et al.*, 2001] R.A. Bauer, J. Kiefer, et N. Hester. Soil amplification maps for estimating earthquake ground motions in the Central US. *Engineering Geology*, 62 : 7–17, 2001.
- [Baumont et Huriot, 1996] C. Baumont et J.-M. Huriot. *La ville et ses représentations formelles*, pages 7–51. P.-H. Derycke, J.-M. Huriot et D. Pumain, 1996.
- [Beck *et al.*, 2003] E. Beck, C. Weber, et M. Granet. Risques sismiques et technologiques, application à l'agglomération de Mulhouse. Dans *Actes des Sixièmes Rencontres de ThéoQuant, 21-22 février 2003, Besançon*, éditeur H. Houot et S. Chardonnel C. Tannier, 2003. 7 p.
- [Beck *et al.*, 2004] E. Beck, S. Glatron, C. Hiegel, et I. Sy. Regards croisés sur la perception des risques par les habitants de Mulhouse (Alsace, France) et de Rufisque (Sénégal). Rapport de recherche interaxes, Laboratoire Image et Ville, 2004. 63 p. + annexes.
- [Beck *et al.*, 2005] E. Beck, C. Weber, et M. Granet. Application of the fuzzy logic to the study of the exposure to dangerous industries. The case of the urban area of Mulhouse (Haut-Rhin, France). Dans *European Colloquium on Theoretical and Quantitative Geography, 9-13 September 2005, Tomar (Portugal)*, 2005. 13 p.
- [Beck *et al.*, 2006a] E. Beck, M. Granet, et C. Weber. Spatial variability of the sites effects in an urban area - the case study of the city of Mulhouse (NE France). *Bull. Soc. Géol. Fr.*, soumis, 2006.
- [Beck *et al.*, 2006b] E. Beck, C. Weber, et M. Granet. Etude multi-risque en milieu urbain et SIG. Le cas de l'agglomération de Mulhouse. *Revue Internationale de Géomatique/International Journal of GIS and Spatial Analysis*, Sous presse : 20 p., 2006.
- [Beck et Glatron, 2006] E. Beck et S. Glatron. La vulnérabilité des citoyens aux risques majeurs. Risques industriels et risque sismique dans l'agglomération de Mulhouse. Dans *SAGEO 2006, Colloque International de Géomatique et d'Analyse Spatiale, Recherche et Développements, Strasbourg, 11-13 septembre 2006*, 2006. 12 p.
- [Beck, 2002] E. Beck. *Cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain à l'aide de modèles. Application à un bassin de risques de la commune de Jausiers (Alpes-de-Haute-Provence)*. Mémoire de DEA, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, 2002. 90 p. + annexes.
- [Bernier, 2004] S. Bernier. La place des élus locaux : entre acceptation et déni des risques, des intérêts à géométrie variable. Dans *Actes des Journées de la Société d'Ecologie Humaine, 1-3 décembre 2004, Bordeaux*, 2004.
- [Berthier, 2000] N. Berthier. *Les techniques d'enquête. Méthode et exercices corrigés*. A. Colin, Cursus, 2000. 254 p.
- [Betbeder-Matibet, 2003] J. Betbeder-Matibet. *Génie parasismique*. Hermès Sciences Publications, 2003. 395 p.
- [Blaikie *et al.*, 1994] P. Blaikie, T. Cannon, I. Davis, et B. Wisner. *At risk : natural hazards, people's vulnerability, and disasters*. Routledge, 1994.
- [Blond *et al.*, 2003] N. Blond, L. Bel, et R. Vautard. Three-dimensional ozone data analysis with an air quality model over the Paris area. *J. Geophys. Res.*, 108(D23) : 4744, 2003.

- [Blond, 2002] N. Blond. *Assimilation de données photochimiques et prévision de la pollution troposphérique*. Thèse de doctorat, Ecole polytechnique, 2002. 202 p.
- [Boitel, 2001] G. Boitel. Lois d'atténuation et risque sismique dans la région de Bâle-Mulhouse. Mémoire de DEA, Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre, Strasbourg, 2001. 41 p.
- [Bonham-Carter, 1994] G.F. Bonham-Carter. *Geographic information systems for geoscientists : modelling with GIS*. Pergamon, 1994. 398 p.
- [Bonjer, 1997] K.-P. Bonjer. Seismicity pattern and style of seismic faulting at the eastern borderfault of the southern Rhine Graben. *Tectonophysics*, 275 : 41–69, 1997.
- [Bonnefoy-Claudet, 2004] S. Bonnefoy-Claudet. *Nature du bruit de fond sismique : implications pour les études des effets de site*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble I, 2004. 241 p.
- [Bonnet, 2002] E. Bonnet. *Risques industriels : évaluation des vulnérabilités territoriales. Le cas de l'estuaire de Seine*. Thèse de doctorat, Université du Havre, 2002. 331 p.
- [Borcherdt, 1970] R.D. Borcherdt. Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 60(1) : 29–61, 1970.
- [Borrel, 1994] G. Borrel. La carte de localisation probable des avalanches. *Mappemonde*, 36 : 17–19, 1994.
- [Bourrelier *et al.*, 2000] P.-H. Bourrelier, G. Deneufbourg, et B. De Vanssay. *Les catastrophes naturelles. Le grand cafouillage*. Osman Eyrolles Santé et Société, 2000. 262 p.
- [BRGM, 2004] BRGM. Journée d'information et d'échanges sur la prise en compte du risque sismique dans la région mulhousienne. Document de présentation synthétique des principaux résultats du scénario sismique, 2004. 24 p.
- [Burton *et al.*, 1978] I. Burton, R.W. Kates, et G.F. White. *The environment as hazard*. Oxford University Press, 1978.
- [Caloz, 2006] R. Caloz. Réflexion sur les incertitudes et leurs propagation en analyse spatiale. Dans *Actes du Colloque International "Observation et analyse des territoires ruraux en Europe"*. Université "Al. I. Cuza", Iasi, Roumanie, avril 2005, éditeur S. Niculescu (dir.), pages 72–87, 2006.
- [Castro *et al.*, 1998] R.R. Castro, M. Mucciarelli, F. Pacor, P. Federici, et A. Zaninetti. Determination of the characteristic frequency of two dams located in the region of Calabria, Italy. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88 : 503–511, 1998.
- [Cauvin, 1984] C. Cauvin. *Espaces cognitifs et transformations cartographiques. Les conditions de la comparaison des espaces cognitifs : de la carte aux configurations. Exemples de l'espace urbain strasbourgeois*. Thèse d'Etat, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, 1984. 303 p. ronéotée.
- [Centre Interdisciplinaire d'Etudes Urbaines, 2002] Centre Interdisciplinaire d'Etudes Urbaines. L'explosion de l'usine AZF à Toulouse : une catastrophe inscrite dans la ville. *Mappemonde*, 2002.1 : 23–28, 2002.
- [Chaline et Dubois-Maury, 1994] C. Chaline et J. Dubois-Maury. *La ville et ses dangers*. Masson, 1994. 244 p.
- [Chardon et Thouret, 1994] A.-C. Chardon et J.-C. Thouret. Cartographie de la vulnérabilité d'une population citadine face aux risques naturels : le cas de Manizales. *Mappemonde*, 1994.4 : 37–40, 1994.
- [Chardon, 1994] A.-C. Chardon. Etude intégrée de la vulnérabilité de la ville de Manizales (Colombie) aux risques naturels. *Revue de géographie alpine*, 1994.4 : 97–111, 1994.

- [Charron et Milochevitch, 2003] S. Charron et A. Milochevitch. Perception des risques et de la sécurité. Résultats du sondage de novembre 2002. Note segr 03/19, Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire - Département de Protection de la Santé de l'Homme et de Dosimétrie. Service d'Évaluation et de Gestion des Risques. Laboratoire de Statistique et d'Études Économiques et Sociales, 2003. 107 p.
- [Chatelain *et al.*, 1996] J.-C. Chatelain, B. Guillier, H. Yepes, J. Fernandez, J. Valverde, B. Tucker, G. Hoeffler, F. Kaneko, M. Souris, E. Duperier, T. Yamada, G. Bustamante, A. Eguez, A. Alvarado, G. Plaza, et C. Villacis. Projet pilote de scénario sismique à Quito (Équateur) : méthode et résultats. *Bull. Inst. fr. études andines*, 25(3) : 553–588, 1996.
- [Chen *et al.*, 2004] K. Chen, J. McAneney, R. Blong, R. Leigh, K. Huner, et C. Magill. Defining area at risk and its effects in catastrophe loss estimation : a dasymmetric mapping approach. *Applied Geography*, 24 : 97–117, 2004.
- [Corona, 2006] S. Corona. Les besoins des assureurs en matière de systèmes d'information géographique et l'intérêt de mutualiser les données sinistres. Dans *Colloque "Géographes et assureurs face aux risques naturels : acteurs complémentaires de la connaissance et de la prévention"*, Guyancourt, 6 avril 2006, 2006. Communication.
- [Crowley et McLafferty, 2002] E.K. Crowley et S.L. McLafferty. *GIS and public health*. Guilford Press, 2002. 340 p.
- [Cutter *et al.*, 2000] S.L. Cutter, J.T. Mitchell, et M.S. Scott. Revealing the vulnerability of people and places : a case study of Georgetown County, South Carolina. *Annals of the Association of American Geographers*, 90(4) : 713–737, 2000.
- [Cutter *et al.*, 2003] S.L. Cutter, B.J. Boruff, et W.L. Shirley. Social vulnerability to environmental hazards. *Social Science Quarterly*, 84(2) : 242–261, 2003.
- [Cutter, 1993] S.L. Cutter. *Living with risk : the geography of technological hazards*. Edward Arnold, 1993. 214 p.
- [Dahle *et al.*, 1995] A. Dahle, A. Climent, W. Taylor, H. Bungum, P. Santos, M. Ciudad Real, C. Lindholm, W. Strauch, et F. Segura. New spectral strong motion attenuation models for Central America. Dans *Proceedings of the fifth international conference on seismic zonation. October 17-19, 1995, Nice, France*, volume 2, pages 1451–1460. Ouest Editions, 1995.
- [Dauphiné, 2001] A. Dauphiné. *Risques et catastrophes. Observer - spatialiser - comprendre - gérer*. Armand Colin, 2001. 288 p.
- [de Martonne, 1909] E. de Martonne. *Traité de géographie physique : climat, hydrographie, relief du sol, biogéographie*. Armand Colin, 1909. 910 p.
- [Debarbieux, 1988] B. Debarbieux. *Les problématiques de l'image et de la représentation en géographie*, pages 199–211. Armand Colin, 1988.
- [Degardin *et al.*, 2001] F. Degardin, P.A. Gaide, et J. Noyelle. Prise en compte des risques par la valorisation des zones inondables en ville. Dans *Actes colloque de Lyon ; risques et territoires, CERTU-CNRS*, volume 2, pages 213–223, 2001.
- [Denis, 1998] H. Denis. *Comprendre et gérer les risques sociotechnologiques majeurs*. Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, 1998. 342 p.
- [Depelteau, 2000] F. Depelteau. *La démarche d'une recherche en sciences humaines. De la question de départ à la communication des résultats*. De Boeck Université, 2000. 417 p.
- [D'Ercole, 1994] R. D'Ercole. Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés : concepts, typologie, modes d'analyse. *Revue de géographie alpine*, 1994.

- [D'Ercole, 1996] R. D'Ercole. Représentations cartographiques des facteurs de vulnérabilité des populations exposées à une menace volcanique. Application à la région du volcan Cotopaxi (Equateur). *Bull. Inst. Etudes andines*, 25(3) : 479–507, 1996.
- [Di Pasquale *et al.*, 2004] G. Di Pasquale, R. Ferlito, G. Orsini, F. Papa, A.G. Pizza, J. Van Dyck, et D. Veneziano. Seismic scenario tools for emergency planning and management. Dans *European Seismological Commission, Potsdam, 12-17 septembre 2004*, 2004. 11 p.
- [Didier et Bouveron, 1993] M. Didier et M. Bouveron. *Guide économique et méthodologique des SIG*. Hermès, 1993. 329 p.
- [Dobry *et al.*, 1976] R. Dobry, I. Oweis, et A. Urzua. Simplified procedures for estimating the fundamental period of a soil profile. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 66 : 1293–1321, 1976.
- [Dollfus et D'Ercole, 1996] O. Dollfus et R. D'Ercole. *Les mémoires des catastrophes au service de la prévision et de la prévention des risques naturels*, pages 7–18. Economica, 1996.
- [DPPR-MEDD *et al.*, 2005] DPPR-MEDD, DGUHC-MTETM, INERIS, CERTU, et CETE. Plans de prévention des risques technologiques. Guide méthodologique. Rapport technique, Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques/Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Direction Générale de l'Urbanisme, de l'Habitat et de la Construction/Ministère des Transports, de l'Équipement, du Tourisme et de la Mer, Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, Centre d'Études sur les Réseaux de Transport et l'Urbanisme, Centres d'Études Techniques de l'Équipement, 2005. 136 p.
- [Dravinski *et al.*, 1996] M. Dravinski, G. Ding, et K.-L. Wen. Analysis of spectral ratios for estimating ground motion in deep basins. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86(3) : 646–654, 1996.
- [DRTEFP, 2006] DRTEFP. Repères : statistiques mensuelles. Le marché du travail en avril 2006. Rapport technique, Direction régionale du travail, de l'emploi et de la formation professionnelle d'Alsace, 2006. 4 p.
- [Dubois-Maury et Chaline, 2002] J. Dubois-Maury et C. Chaline. *Les risques urbains*. Armand Colin, 2002. 208 p.
- [Dubos *et al.*, 2003] N. Dubos, A. Souriau, C. Ponsolles, J.-F. Fels, et G. Sénéchal. Etudes des effets de site dans la ville de Lourdes (Pyrénées, France) par la méthode des rapports spectraux. *Bull. Soc. géol. Fr.*, 174(1) : 33–44, 2003.
- [Ducret, 1994] B. Ducret. *White, Burton, Kates, Saarinen et les autres*, pages 81–99. Reclus, 1994.
- [Dumolard, 2006] P. Dumolard. Imprécision et incertitude en information géographique pour l'aménagement. Dans *Actes du Colloque International "Observation et analyse des territoires ruraux en Europe"*. Université "Al. I. Cuza", Iasi, Roumanie, avril 2005, pages 88–101. S. Niculescu (dir.), 2006.
- [Duval, 1994] A.-M. Duval. *Détermination de la réponse d'un site aux séismes à l'aide du bruit de fond : évaluation expérimentale*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 1994. 265 p.
- [El Jammal et Baumont, 2005] M.-H. El Jammal et G. Baumont. Perception des risques et de la sécurité. Résultats du sondage d'octobre 2004. Note DSDRE/UGR 05/03, Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire - Unité de gestion des risques. Direction de la Stratégie, du Développement et des Relations Extérieures, 2005. 74 p.
- [Fabiani et Theys, 1987] J.-L. Fabiani et J. Theys. *La société vulnérable*. Presses de l'École Normale Supérieure, 1987. 674 p.

- [Fäcke *et al.*, 2006] A. Fäcke, S. Parolai, S. M. Richwalski, et L. Stempniewski. Assessing the vibrational frequencies of the cathedral of Cologne (Germany) by means of ambient seismic noise analysis. *Natural Hazards*, 38 : 229–236, 2006.
- [Fäh *et al.*, 1997] D. Fäh, E. Ruettener, Th. Noack, et P. Kruspan. Microzonation of the city of Basel. *Journal of Seismology*, 1 : 87–102, 1997.
- [Fäh *et al.*, 2001] D. Fäh, F. Kind, K. Lang, et D. Giardini. Earthquake scenarios for the city of Basel. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 21 : 405–413, 2001.
- [Fäh et Deichmann, 2001] D. Fäh et N. Deichmann. Le prochain tremblement de terre ne doit pas nous surprendre. Article de presse pour la Société Suisse du Génie Parasismique et de la Dynamique des Structures, 2001. 9 p.
- [Favier et Granet-Abisset (dir.), 2000] R. Favier et A.-M. Granet-Abisset (dir.). *Histoire et mémoire des risques naturels*. MSH-Alpes, 2000. 281 p.
- [FEMA, 1995] FEMA. National mitigation strategy : partnerships for building safer communities. Rapport technique, Federal Emergency Management Agency, 1995.
- [FEMA, 1997] FEMA. Multi-hazard identification and risk assessment. Rapport technique, Federal Emergency Management Agency, 1997.
- [Fiedl et K.Jacob, 1993] E.H. Fiedl et K.Jacob. The theoretical response of sedimentary layers to ambient seismic noise. *Geophysical Res. Lett.*, 20-24 : 2925–2928, 1993.
- [Field et Jacob, 1995] E.H. Field et K.H. Jacob. A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 85(4) : 1127–1143, 1995.
- [Fouchier, 1998] V. Fouchier. *Les densités urbaines et le développement durable. Le cas de l’Ile-de-France et des villes nouvelles*. SGVN, 1998. 212 p.
- [Fowler et Hennessy, 1995] A. M. Fowler et K. J. Hennessy. Potential impacts of global warming on the frequency and magnitude of heavy precipitation. *Natural Hazards*, 11(3) : 283–303, 1995.
- [Frémont, 2001] A. Frémont. *Portrait de la France. Villes et Régions*. Flammarion, 2001. 782 p.
- [Gaillard et Clavé, 2006] J.-C. Gaillard et E. Clavé. Programme Tsunarisque. projet culturel. rapport de mission en Indonésie (Yagyakarta, Banda Aceh, Simeulue et Meulaboh) - 25 janvier-18 février 2006. Rapport technique, Laboratoire Territoires, UMR PACTE 5194 CNRS, Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier, Grenoble I - Laboratoire Archipel, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, 2006. 23 p.
- [Gallipoli *et al.*, 2004] M.R. Gallipoli, M. Mucciarelli, R.R. Castro, G. Monachesi, et P. Contri. Structure, soil-structure response and effects of damage based on observations of horizontal-to-vertical spectral ratios of microtremors. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24 : 487–495, 2004.
- [Gambolati *et al.*, 2002] G. Gambolati, P. Teatini, et M. Gonella. GIS simulations of the inundation risk in the coastal lowlands of the northern Adriatic Sea. *Mathematical and Computer Modelling*, 35 : 963–972, 2002.
- [Gesbert, 2005] N. Gesbert. *Formalisation des spécifications de bases de données géographiques en vue de leur intégration*. Thèse de doctorat, Université de Marne-la-Vallée, Institut Géographique National, 2005. 133 p.
- [Girard, 2004] V. Girard. Habiter près d’une centrale nucléaire : une approche ethnologique de la quotidienneté du risque. Dans *Actes des Journées de la Société d’Ecologie Humaine, 1-3 décembre 2004, Bordeaux*, 2004.

- [Gitterman *et al.*, 1996] Y. Gitterman, Y. Zaslavsky, A. Shapira, et V. Shtivelman. Empirical site response evaluations : case studies in Israel. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 15 : 447–463, 1996.
- [Glade et van Elverfeldt, 2005] T. Glade et K. van Elverfeldt. MultiRISK. An innovative conceptual approach to model natural risks. Dans *European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria, 24-29 avril 2005*, 2005. Poster.
- [Glade, 2003] T. Glade. Vulnerability assessment in landslide risk analysis. *Die Erde*, 134(2) : 123–146, 2003.
- [Glatron et Beck, 2005] S. Glatron et E. Beck. Les actions de planification et d’information pour la prévention des risques dans l’agglomération de Mulhouse : des points de vue et perceptions différenciés des risques majeurs urbains ? *Cahiers de l’IAURIF*, 142 : 105–117, 2005.
- [Glatron et Frasca, 1999] S. Glatron et R. Frasca. La représentation et la gestion des risques urbains par les systèmes d’information géographiques. Rapport de recherche, CRIA, 1999. 68 p.
- [Glatron, 1997] S. Glatron. *L’évaluation des risques technologiques majeurs en milieu urbain : une approche géographique. Le cas de la distribution des carburants dans la Région Ile-de-France*. Thèse de doctorat, Université Paris 1, 1997. 392 p.
- [Glatron, 2003] S. Glatron. *Culture des risques*, pages 71–87. Editions du Temps, 2003.
- [Gleyze, 2002] J.-F. Gleyze. Le risque. Rapport technique, Institut National Géographique - Laboratoire COGIT, 2002. 256 p.
- [Golden Software, 2002] Golden Software. *Surfer 8 user’s guide*. Golden Software Inc, 2002. 640 p.
- [Granet et Boulanger, 2004] M. Granet et M.-O. Boulanger. Microzonage de la région sud du Rhin Supérieur, Contrat INTERREG III n°3c.8. Rapport d’activité 2004. Rapport technique, Institut de Physique du Globe de Strasbourg (coord.), 2004. 127 p.
- [Griot et Ayrat, 2002] C. Griot et P.-A. Ayrat. Terminologie en science du risque. Recueil de définitions, d’après le document du travail du colloque international dire le risque : le risque en examen, Mèze, 18-20 mai 2001, Groupe des Ecoles des Mines, 2002. 87 p.
- [Grunthal (dir.), 2001] G. Grunthal (dir.). L’Echelle Macrosismique Européenne - European Macroseismic Scale 1998. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, vol. 19, Ministère de la Culture, de l’Enseignement Supérieur et de la Recherche du Luxembourg, Conseil de l’Europe, 2001. 103 p.
- [Guéguen *et al.*, 1998] P. Guéguen, J.-L. Chatelain, B. Guillier, H. Yepes, et J. Egred. Site effect and damage distribution in Pujili (Ecuador) after the 28 March earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 17 : 329–334, 1998.
- [Guéguen *et al.*, 2000] P. Guéguen, J.-L. Chatelain, B. Guillier, et H. Yepes. An indication of the soil topmost layer response in Quito (Ecuador) using H/V spectral ratio. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19 : 127–133, 2000.
- [Hartzell, 1978] S.H. Hartzell. Earthquake aftershocks as Green’s function. *Geophysical Res. Lett.*, 5 : 1–4, 1978.
- [Henry, 2004] J.-B. Henry. *Systèmes d’information spatiaux pour la gestion du risque d’inondation de plaine*. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, 2004. 192 p. + annexes.
- [Hiegel *et al.*, 2004] C. Hiegel, E. Beck, S. Glatron, et I. Sy. La représentation des risques par les riverains des usines dangereuses. Dans *Actes des Journées de la Société d’Ecologie Humaine, 1-3 décembre 2004, Bordeaux*, 2004. 16 p.

- [Hiegel, 2001] C. Hiegel. Risque technologique mineur : base de données localisées et visualisation. L'exemple des stations-service de la Communauté Urbaine de Strasbourg. Dans *Actes des Cinquièmes Rencontres de ThéoQuant, édités par D. Josselin et H. Houot, 22 et 23 février 2001, Université de France-Comté, 2001*. 13 p.
- [Hiegel, 2003] C. Hiegel. *Des risques urbains méconnus : les risques technologiques mineurs, exemple des stations-service à Strasbourg*. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, 2003. 400 p.
- [IGN, 2002] IGN. BD Topo@Pays Version 1.2. Descriptif de contenu. Edition 1.0. Rapport technique, Institut Géographique National, 2002. 118 p.
- [IGN, 2003] IGN. BD Topo@Pays Version 1.2. Descriptif technique. Edition 2.1. Rapport technique, Institut Géographique National, 2003. 12 p.
- [IMIRILAND, 2003] IMIRILAND. Relevant criteria to assess vulnerability and risk. Deliverable D16. Rapport technique, IMIRILAND, Impact of Large Landslides in the Mountain Environment : Identification and Mitigation of Risk. Contract n° EVG1-CT-2000-00035, 2003. 10 p.
- [INERIS, 2001] INERIS. Risques naturels et environnement industriel (DRA-013). Rapport intermédiaire. Opération a : synthèse sur les risques dus aux séismes, inondations, mouvements de terrain et tempêtes - accidentologie. Rapport technique, Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, Direction des Risques Accidentels, 2001. 54 p.
- [INERIS, 2002] INERIS. Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels. (DRA-006) feux de nappe. Rapport technique, Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques - Direction des Risques Accidentels, 2002. 96 p.
- [ISTED, 2005] ISTED. *Systèmes d'information géographique et gestion des risques. Geographic information systems and disaster management*. ISTED, 2005. 101 p.
- [Joliveau, 2004] Th. Joliveau. *Géomatique et gestion environnementale du territoire. Recherches sur un usage géographique des SIG*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches en sciences humaines, Université de Rouen, 2004. 504 p.
- [King *et al.*, 2000] R.J.T. King, J. Aston, E.N. Bucket, M. Capobianco, N. Mizutani, R.J. Nicholls, P.D. Nunn, et S. Ragoonaden. Coastal adaptation technologies. volume Methodological and Technological Issues in Technology Transfer. Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 349-372, Cambridge University Press 2000.
- [Koller *et al.*, 2004] M. G. Koller, J.-L. Chatelain, B. Guillier, A.-M. Duval, K. Atakan, C. Lacave, P.-Y. Bard, et the SESAME participants. Practical user guidelines and software for the implementation of the H/V ratio technique : measuring conditions, processing method and results interpretation. Dans *13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004*, 2004. Paper no. 3132, 10 p.
- [Kudo, 1995] K. Kudo. Practical estimates of site response, state-of-the-art report. Dans *Proc. of the Fifth International Conference on Seismic Zonation, October 17-19, Nice, France*, volume 3, pages 1878–1907. Ouest Editions Nantes, 1995.
- [Lacave *et al.*, 1999] C. Lacave, P.-Y. Bard, et M. G. Koller. Microzonation : techniques and examples. In : Block 15 : Naturgefahren-Erdbebenrisiko, 1999.
- [Lachet *et al.*, 1996] C. Lachet, D. Hartzfeld, P.-Y. Bard, N. Theodulidis, C. Papaioannou, et A. Avvaïdis. Site effects and microzonation in the city of Thessaloniki (Greece). Comparison of different approaches. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86(6) : 1692–1703, 1996.

- [Lachet et Bard, 1994] C. Lachet et P.-Y. Bard. Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique. *J. Phys. Earth*, 42 : 377–397, 1994.
- [Lalo *et al.*, 1993] A. Lalo, F. Sala, J. Martin, S. Glatron, B. Bertrando, et S. Lefeuvre. 9 novembre 1992. accident à l'usine TOTAL de la Mède. Comment les populations ont-elles réagi? Rapport technique, Rapport réalisé pour la société TOTAL et les Mairies de Martigues et Châteauneuf-lès-Martigues, Crisis, Nice, 1993. 132 p.
- [Lalo *et al.*, 1994] A. Lalo, A. Le Saux, J. Martin, F. Sala, et S. Glatron. Usines d'incinération et décharges : acceptabilité et résistances des Franciliens, enquête auprès des populations. tome 1 : les enjeux. tome 2 : le débat public. Rapport technique, Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Ile-de-France, 1994.
- [Lalo *et al.*, 1995] A. Lalo, L. Legalt, M. Lombardi, C. Wetkoff, P. Cole, S. Renoux, et J. Martin. Enquête sur la perception des risques technologiques majeurs dans l'agglomération du Havre. Rapport technique, Université du Havre, Université de Lancaster, Université de Berlin, Université de Milan, Université de Liège, Commission des Communautés Européennes, 1995. 80 p.
- [Lambert (dir.), 1997] J. Lambert (dir.). *Les tremblements de terre en France, hier, aujourd'hui, demain*. BRGM, 1997. 196 p.
- [Langston, 1979] C.A. Langston. Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves. *J. Geophys. Res.*, 84 : 4749–4762, 1979.
- [Le Brun *et al.*, 2001] B. Le Brun, D. Hartzfeld, et P.-Y. Bard. Site effects study in urban area : experimental results in Grenoble (France). *Pure Appl. Geophys.*, 128 : 2543–2557, 2001.
- [Le Brun, 1997] B. Le Brun. *Les effets de site*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 1997. 208 p.
- [Léone *et al.*, 1995] F. Léone, J.-P. Aste, et E. Velasquez. Contribution des constats d'endommagement au développement d'une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité appliquée aux phénomènes de mouvements de terrain. *Bull. Assoc. Géogr. Français*, 1995-4 : 350–371, 1995.
- [Léone, 1995] F. Léone. *Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par les phénomènes de mouvements de terrain*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 1995. 274 p.
- [Lermo *et al.*, 1992] J. Lermo, S. Francisco, et J. Chavez-Garcia. Site effect evaluation using microtremors : a review (abstract). *EOS*, 73 : 352, 1992.
- [Lermo et Chavez-Garcia, 1993] J. Lermo et F. Chavez-Garcia. Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83(5) : 1574–1594, 1993.
- [Lévy, 1999] J. Lévy. *Le tournant géographique. Penser l'espace pour lire le monde*. Belin, 1999. 400 p.
- [Lindell et Barnes, 1986] M.K. Lindell et V.E. Barnes. Protective response to technological emergency : risk perception and behavioral intention. *Nuclear Safety*, 27(4) : 457–467, 1986.
- [Livet et Oberlé (dir.), 1977] G. Livet et R. Oberlé (dir.). *Histoire de Mulhouse des origines à nos jours*. Editions des Dernières Nouvelles d'Alsace, ISTRA, 1977. 493 p.
- [Lynch, 1960] K. Lynch. *The image of the city*. MIT Press, 1960. 202 p.
- [Madariaga et Perrier, 1991] R. Madariaga et G. Perrier. *Les tremblements de terre*. Presses du CNRS, 1991. 210 p.

- [Mancebo, 2003] F. Mancebo. *Questions d'environnement pour l'aménagement et l'urbanisme*. Editions du Temps, 2003. 287 p.
- [Manche, 1998] Y. Manche. Cartographie multi-risques : une méthode semi-automatique. *Ingénieries - eau, agriculture, territoires*, 1998 (numéro spécial "risques naturels") : 115–119, 1998.
- [Maquaire *et al.*, 2004] O. Maquaire, Y. Thiery, J.-P. Malet, C. Weber, A. Puissant, et A. Wania. Current practices and assessment tools of landslide vulnerability in mountainous basins. Identification of exposed elements with a semi-automatic procedure. Dans *Landslide evaluation and stabilization*, éditeur Fountorera S.A.B. Sayão A.S.F. Lacerda W.A., Ehrlich M., volume 1. A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 2004.
- [Marcot et Arnal, 2004] N. Marcot et C. Arnal. Méthodologie de réalisation d'un scénario de séisme sur la ville de Mulhouse (68). Rapport technique, Rapport BRGM/RP-52760-FR, 2004. 74 p.
- [Marin *et al.*, 2004] S. Marin, J.-P. Avouac, M. Nicolas, et A. Schlupp. A probabilistic approach to seismic hazard in Metropolitan France. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 94(6) : 2137–2163, 2004.
- [Martin, 2004] B. Martin. *Les risques en géographie : de la théorie à la démarche appliquée. Prise en compte, évaluation, traduction des risques*, pages 147–164. Histoire et Anthropologie, 2004.
- [MATE *et al.*, 2002] MATE, Préfecture du Haut-Rhin, et Mairie de Mulhouse. Dossier communal synthétique de la ville de Mulhouse (Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement), 2002.
- [MATE et METL, 1999] MATE et METL. Plans de Prévention des Risques Naturels (PPR) : risques de mouvements de terrain. Rapport technique, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, 1999.
- [MEDD et METLTM, 2002] MEDD et METLTM. Plans de Prévention des Risques Naturels (PPR). Risque sismique. Guide méthodologique. Rapport technique, Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, 2002. 112 p.
- [Meghraoui *et al.*, 2001] M. Meghraoui, B. Delouis, M. Ferry, D. Giardini, P. Huggenberger, I. Spottke, et M. Granet. Active normal faulting in the Upper Rhine Graben and Paleoseismic Identification of the 1356 Basel Earthquake. *Science*, 293 : 2070–2073, 2001.
- [Mejia-Navarro et Garcia, 1996] M. Mejia-Navarro et L.A. Garcia. Natural hazard and risk assessment using decision support system. Application. *Environmental and Engineering Geosciences*, 2(3) : 299–324, 1996.
- [Meschinet de Richemond, 2003] N. Meschinet de Richemond. *Statut et perception des catastrophes passées : vers une histoire des risques naturels*, pages 138–156. Editions du Temps, 2003.
- [Mieg, 1982] J. Mieg. *Les manufactures du Haut-Rhin (1822-1825)*. Contades, 1982.
- [Milutinovic *et al.*, 2004] Z. Milutinovic, M. Mucciarelli, M. Herak, A. Gosar, et D. Albarelo. Assessment of seismic site amplification and seismic building vulnerability in the former Yugoslav Republic of Macedonia, Croatia and Slovenia. project sfp 980857. Rapport technique, University Ss. Cyril and Methodius, Skopje (coord.), 2004. 76 p.
- [Minciardi *et al.*, 2005] R. Minciardi, R. Sacile, A.-C. Taramasso, E. Trasforini, et S. Traverso. Modeling the vulnerability of complex territorial systems : an application to hydrological risk. *Environmental Modelling and Software*, in press, 2005.

- [Mosquera Machado, 2002] S. Mosquera Machado. *Analyse multi-aléas et risques naturels dans le département du Chocó (nord-ouest de la Colombie)*. Thèse de doctorat, Université de Genève, 2002.
- [Mouroux *et al.*, 2004] P. Mouroux, B. Le Brun, S. Depinois, E. Bertrand, et P. Masure. Projet européen RISK-UE : application à la ville de Nice. Rapport brgm/rp-53202, BRGM, 2004. 137 p.
- [Moya *et al.*, 2000] A. Moya, V. Schmidt, C. Segura, I. Boschini, et K. Atakan. Empirical evaluation of site effects in the metropolitan area of San José, Costa Rica. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 20 : 177–185, 2000.
- [Nakabasami *et al.*, 2006] C. Nakabasami, C. Hiegel, et E. Beck. Seamless diffusion of heterogeneous risk information within a specific region. Dans *25th Urban Data Management Symposium, 15-17 mai 2006, Aalborg, Danemark*, 2006. 12 p.
- [Nakamura *et al.*, 1999] Y. Nakamura, E.D. Gurler, et J. Saita. Dynamic characteristics of Leaning Tower of Pisa using microtremor-preliminary results. Dans *Proceedings of 25th JSCE Earthquake Engineering Symposium*, volume 2, pages 921–924, 1999.
- [Nakamura, 1989] Y. Nakamura. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI), Japan*, 30(1) : 25–33, 1989.
- [Nakamura, 1996] Y. Nakamura. Real-time information systems for seismic hazard mitigation UrEDAS, HERAS and PIC. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI), Japan*, 37(3) : 112–127, 1996.
- [Nakamura, 2000] Y. Nakamura. Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. Dans *Proceedings of the XII World Conf. Earthquake Engineering, New Zealand*, 2000. paper n°2656.
- [Nath, 2005] S.K. Nath. An initial model of seismic microzonation of Sikkim Himalaya through thematic mapping and GIS integration of geological and strong motion features. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25 : 329–343, 2005.
- [Nivière et Winter, 2000] B. Nivière et Th. Winter. Pleistocene northwards fold propagation of the Jura within the southern Upper Rhine Graben : seismotectonic implications. *Global and Planetary Change*, 27 : 263–288, 2000.
- [November, 2000] V. November. Comment concilier logiques du territoire et logiques du risque ? Dans *Représentation et gestion des risques urbains - modèles organisationnels et outils d'information géographique. Séminaire Fondation MAIF, IDESS, IRESCO, Centre de formation de Marseille-Luminy, 31 janvier 2000*, 2000.
- [November, 2002] V. November. *Les territoires du risque*. Peter Lang, 2002. 332 p.
- [Ohmachi *et al.*, 1991] T. Ohmachi, Y. Nakamura, et T. Toschinawa. Ground motion characteristics of surface ground using microtremor. Dans *Proc. 45th Annual Meeting of JSCE*, pages 1068–1069, 1991.
- [Ojeda et Escallon, 2000] A. Ojeda et J. Escallon. Comparison between different techniques for evaluation of predominant periods using strong ground motion records and microtremors in Pereira, Colombia. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 20 : 137–143, 2000.
- [Pareschi *et al.*, 2000] M.T. Pareschi, L. Cavarra, M. Favalli, F. Giannini, et A. Meriggi. GIS and volcanic risk management. *Natural Hazards*, 21 : 361–379, 2000.
- [Polère *et al.*, 2004] C. Polère, S. Decelle, et A. Mokhtari. Les représentations sociales des risques : des rationalités multiples. Fiche de synthèse, 15 p., 2004.

- [Pottier, 2006] N. Pottier. L'enquête et le diagnostic territorial, outils de connaissance des risques et de prévention aux échelons individuel et collectif. Dans *Colloque "Géographes et assureurs face aux risques naturels : acteurs complémentaires de la connaissance et de la prévention"*, Guyancourt, 6 avril 2006, 2006. Communication.
- [Propeck-Zimmermann *et al.*, 2002] E. Propeck-Zimmermann, L. Ravenel, et T. Saint-Gérard. Cartographie des risques technologiques majeurs : nouvelles perspectives avec les SIG. *Mappemonde*, 65 : 17–21, 2002.
- [Propeck-Zimmermann, 2003] E. Propeck-Zimmermann. *L'inscription des risques dans l'espace : difficultés d'appréhension et de représentation. L'exemple des risques industriels*, pages 157–172. Editions du Temps, 2003.
- [Provitolo, 2002] D. Provitolo. *Risque urbain, catastrophe et villes méditerranéennes*. Thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, 2002. 365 p.
- [Ramadier et Bronner, 2006] T. Ramadier et A.-C. Bronner. Knowledge of the environment and spatial cognition : JRS as a technique for improving comparisons between social groups. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 33 : 285–299, 2006.
- [REKLIP, 1996] REKLIP. Atlas climatique du fossé rhénan - Klimaatlas Oberrhein Mitte-Süd. Atlas, IFG Offenbach, VDF Zurich, 1996. 2 vol., 74 cartes, 212 p. + annexes.
- [Ressources naturelles Canada, 2006] Ressources naturelles Canada. Evaluation de l'aléa sismique au Canada. Site internet, 2006.
- [Rey, 2000] J. Rey. Le risque sismique dans les vallées alpines profondes. Microzonage sismique de la vallée de Brigue (Valais, Suisse). Modélisation 1D et 3D des effets de site dans la vallée de Grenoble (France). Diplôme d'ingénieur, Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre, 2000. 106 p.
- [Riepl-Thomas et Cotton, 1999] J. Riepl-Thomas et F. Cotton. Les effets de site : importance, compréhension et estimation. *Cahiers techniques de l'AFPS : Failles, ruptures, ondes et mouvements forts pour l'ingénieur : la chaîne de l'aléa sismique*, 17 : 41–61, 1999.
- [Riepl, 1997] J. Riepl. *Effets de site : évaluation expérimentale et modélisations multidimensionnelles : application au site test EURO-SEISTEST (Grèce)*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 1997. 227 p.
- [Ronté, 2003] C. Ronté. Etude et analyse critique des méthodes d'évaluation des risques naturels par l'exploitation des SIG. Diplôme d'études supérieures spécialisées de cartographie et de systèmes d'information géographique, EPFL, ENSG, Université Paris I Panthéon Sorbonne, 2003. 29 p. + annexes.
- [Rosset *et al.*, 2002] P. Rosset, A De la Puente, L. Chounard, D. Mitchell, et J. Adams. Site effect assessment at small scales in urban areas : a tool for preparedness and mitigation. Dans *Proceedings of the "Improving post-disaster reconstruction in developing countries" conference, 23-25 May 2002, Montréal*, 2002. 13 p.
- [Rouet, 1991] P. Rouet. *Les données dans les systèmes d'information géographique*. Hermès, 1991. 278 p.
- [Roullé *et al.*, 2006] A. Roullé, E. Beck, A. Bitri, B. Le Brun, et M. Granet. Microzonation of the Mulhouse area (NE of France). Dans *Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Grenoble, 30 août-1 septembre 2006*, 2006. paper n°22.
- [Royet, 1998] B.-G. Royet. La prise en compte du risque sismique dans une petite commune. L'exemple de Wickerschwihr (Haut-Rhin). *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 217(4174) : 31–52, 1998.

- [Royet, 2006] B.-G. Royet. La vulnérabilité. Club risque "risque sismique" - préfecture du Haut-Rhin, 2 mars 2006, communication, 2006.
- [Ruas, 2004] A. Ruas. *Le changement de niveau de détail dans la représentation de l'information géographique*. Habilitation à diriger des recherches, Université de Marne-la-Vallée, 2004. 99 p.
- [Sabourault *et al.*, 2001] P. Sabourault, P. Dominique, M. Imbault, B. Le Brun, et G. Richalet. Réseau accélérométrique du Fossé rhénan supérieur : mesures H/V. Rapport Technique BRGM/RP-51015-FR, BRGM, 2001. 60 p.
- [Sadigh *et al.*, 1997] K. Sadigh, C.-Y. Chang, J.A. Egan, F. Makdisi, et R.R. Youngs. Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data. *Seism. Res. Lett.*, 68(1) : 180–189, 1997.
- [Sauvagnargues-Lesage, 2001] S. Sauvagnargues-Lesage. *De la prévention à la gestion de crise : l'utilisation des SIG*, pages 25–46. Hermès, 2001.
- [Schneegans, 2005] S. Schneegans. Why recovery is taking so long - interview of Stephen Hill, Resident Co-ordinator of the United Nations and Co-ordinator of Humanitarian Relief in Aceh . *A World of Science, UNESCO*, 3(4) : 13–15, 2005.
- [Sèbe, 1998] O. Sèbe. Evaluation des effets de site à l'échelle locale cantonale : contribution méthodologique et applications aux cantons de Huningue et Sierentz. Mémoire de fin d'études d'ingénieur de l'EOST, Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre, Strasbourg, 1998. 82 p.
- [Sheeren, 2005] D. Sheeren. *Méthodologie d'évaluation de la cohérence inter-représentations pour l'intégration de bases de données spatiales. Une approche combinant l'utilisation de métadonnées et l'apprentissage automatique*. Thèse de doctorat, Université Paris 6, Institut Géographique National, 2005. 292 p.
- [Silvano, 2002] S. Silvano. An EU-funded project : ALARM, Assessment of Landslide Risk and Mitigation in Mountainous Area. EVG1-2001-00018, 2002.
- [Simonet et Marcot, 2004] F. Simonet et N. Marcot. Commune de Mulhouse (68). vulnérabilité du bâti. Rapport technique, Rapport BRGM/RP-52761-FR, 2004. 202 p.
- [Slovic, 1999] P. Slovic. Trust, emotion, sex, politics and science : surveying the risk-assessment battlefield. *Risk Analysis*, 19(4) : 689–701, 1999.
- [Tazieff, 1969] H. Tazieff. *Quand la terre tremble*. Fayard, 1969. 383 p.
- [Théobald et Schweitzer, 1976] N. Théobald et M. Schweitzer. Notice explicative de la carte géologique XXXVVII-XXXVIII-20 de Mulhouse-Müllheim, 413 - Bassin Potassique. Rapport technique, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, 1976. 27 p.
- [Theodulidis et Papazachos, 1992] N.P. Theodulidis et B.C. Papazachos. Dependence of strong ground motion on magnitude-distance, site geology and macroseismic intensity for shallow earthquakes in Greece : I, peak horizontal acceleration, velocity and displacement. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 11 : 387–402, 1992.
- [Thiery *et al.*, 2005] Y. Thiery, J.-P. Malet, S. Sterlacchini, A. Puissant, et O. Maquaire. Analyse spatiale de la susceptibilité des versants aux mouvements de terrain, comparaison de deux approches spatialisées par SIG. *Revue Internationale de Géomatique/European Journal of GIS and Spatial Analysis*, 15(2) : 227–245, 2005.
- [Thouret et D'Ercole, 1996] J.-C. Thouret et R. D'Ercole. Vulnérabilité aux risques naturels en milieu urbain : effets, facteurs et réponses sociales. *Cah. Sci. hum.*, 32(2) : 407–422, 1996.

- [Timmerman, 1981] P. Timmerman. Vulnerability, resilience and the collapse of society. Environmental monograph n°1. Rapport technique, Institute for Environmental Studies, University of Toronto, 1981.
- [Tixier *et al.*, 2002] J. Tixier, G. Dusserre, O. Salvo, et D. Gaston. Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 15 : 291–303, 2002.
- [Tobler, 1976] W. R. Tobler. Spatial interaction patterns. *Journal of Environmental Systems*, 6(4) : 271–301, 1976.
- [Tricart, 1958] J. Tricart. *Etude de la crue de la mi-juin 1957 dans les vallées du Guil, de l'Ubaye et de la Cerveyrette et les aspects géomorphologiques de leur reconstruction*. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 1958. ronéotypé.
- [UN-DESA, 2004] UN-DESA. World urbanization prospects. the 2003 revision. data tables and highlights. Rapport technique, United Nations Departement of Economic and Social Affairs - Population Division, 2004. 21 p.
- [UNISDR, 2002] UNISDR. *Living with risk. A global review of disaster reduction initiatives (United Nations International Strategy for Disaster Reduction Secretariat)*. United Nations, 2002. 382 p.
- [Valache, 2003] M. Valache. Entreprises et risques de crues à Paris et en petite couronne. Rapport de la Chambre de Commerce et d'Industrie de Paris, Commission de l'Aménagement Régional, de l'Environnement, du Tourisme et des Transports, 2003. 85 p.
- [Van Westen, 2000] C.J. Van Westen. The modelling of landslides hazards using GIS. *Surveys in Geophysics*, 21 : 241–255, 2000.
- [Veyret et Meschinot de Richemond, 2003] Y. Veyret et N. Meschinot de Richemond. *Le risque, les risques : représentation, gestion et expression spatiale du risque*, pages 35–46. SEDES, coll. DIEM, 2003.
- [Veyret, 2001] Y. Veyret. *Géographie des risques naturels*. La Documentation Française, 2001. 64 p.
- [Veyret, 2004] Y. Veyret. *Géographie des risques naturels en France. De l'aléa à la gestion*. Hatier, coll. Initial, 2004. 251 p.
- [Veyret, 2006] Y. Veyret. Risques naturels et géographie : vulnérabilité et assurances. Dans *Colloque "Géographes et assureurs face aux risques naturels : acteurs complémentaires de la connaissance et de la prévention"*, Guyancourt, 6 avril 2006, 2006. Communication.
- [Villemin et Coletta, 1990] T. Villemin et B. Coletta. Subsidence in the Rhine Graben : a compilation of borehole data. Dans *Symposium on Rhin-Rhone Rift System, ICL-WG3 Symp.*, page 31. Geol. Ins. Univ. Basel, 1990.
- [Vincent, 2005] M. Vincent. *Cartographie sous SIG de l'aléa retrait-gonflement des argiles à des fins préventives - France*, pages 12–15. ISTED, 2005.
- [Weber, 1995a] C. Weber. *De la banque de données urbaines au système d'information géographique urbain*, pages 15–29. Anthropos, Coll. Villes, 1995.
- [Weber, 1995b] C. Weber. Voir la ville autrement. *Annales des Ponts et Chaussées : Nouvelles technologies pour la ville*, 78 : 21–28, 1995.
- [Wells et Coppersmith, 1994] D.L. Wells et K.J. Coppersmith. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84(4) : 974–1002, 1994.
- [White, 1945] G.F. White. Human adjustment to flood. Research paper 29, University of Chicago, Department of Geography, 1945.

- [Widmer *et al.*, 2003] F. Widmer, B. Duvernay, D. Fäh, et A. Parriaux. Projet pilote de microzonage sismique à Yverdon (VD). *Bull. angew. Geol*, 8/1 : 5–16, 2003.
- [Winckell *et al.*, 2000] A. Winckell, M. Le Page, G.C. Velazco, R.V. Gonzalez, R.C. Sotomayor, et C.G. Velazquez. ¿Y si un terremoto de magnitud 6.5 se produjera en la falla de La Nación? Aportes para un escenario sísmico en Tijuana. Rapport technique, El Collegio de la Frontera Norte - Institut de Recherche pour le Développement, 2000. 74 p.
- [Wössner *et al.*, 2002] J. Wössner, M. Trem, et F. Wenzel. Simulation of $M_W = 6.0$ earthquakes in the Upper Rhinegraben using empirical Green functions. *Geophys. J. Int.*, 151 : 487–500, 2002.
- [WP02 SESAME Project, 2003] WP02 SESAME Project. Final report on measurement guidelines. SESAME European project. WP02 - H/V technique : experimental conditions. Deliverable D08.02. Rapport technique, European Commission - Research General Directorate, 2003. 96 p.
- [WP12 SESAME Project, 2004] WP12 SESAME Project. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. Measurements, processing and interpretation. SESAME European project. WP12 - Deliverable D23.12. Rapport technique, European Commission - Research General Directorate, 2004. 62 p.
- [Yamanuka *et al.*, 1994] H. Yamanuka, M. Takemura, H. Ishida, et M. Niwa. Characteristics of long-period microtremors and their applicability in exploration of deep sedimentary layers. *Bull. Seism. Soc. Am*, 84 : 1831–1841, 1994.
- [Zare *et al.*, 1999] M. Zare, P.-Y. Bard, et M. Ghafory-Ashtiany. Soil characterization for the Iranian strong motion network. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 18 : 101–123, 1999.
- [Zaslavsky *et al.*, 2000] Y. Zaslavsky, A. Shapira, et A. Arzi. Amplification effects from earthquake and ambient noise in the Dead Sea rift (Israel). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 20 : 187–207, 2000.
- [Zonabend, 1989] F. Zonabend. *La presqu'île au nucléaire*. Odile Jacob, 1989. 188 p.

Table des matières

Remerciements	3
Introduction générale	5
1 Étude multi-risques en milieu urbain : contexte, concepts, objectifs	9
1.1 Le risque, objet d'étude pluridisciplinaire	9
1.1.1 Histoire du risque	9
1.1.2 Définitions	11
1.1.2.1 Des visions disciplinaires et complémentaires du risque . . .	11
1.1.2.2 L'aléa	14
1.1.2.3 La vulnérabilité des éléments exposés	15
1.1.2.4 Exposition	16
1.1.2.5 Risques majeurs	17
1.1.2.6 Catastrophe	17
1.1.3 Dimension sociale des risques	18
1.1.3.1 Représentation cognitive des risques et relation avec la vulnérabilité	18
1.1.3.2 Culture des risques	20
1.1.4 Dimension spatiale des risques	22
1.1.5 Dimension législative des risques	23
1.2 La nécessité d'une approche multi-risques intégrée	24
1.2.1 Démarche sectorisée et démarche intégrée	24
1.2.2 Approche mono-sectorielle et approche multi-risques	25

1.2.2.1	Types d'interactions et exemples d'interactions observées	25
1.2.2.2	Études multi-risques et pluri-sectorielles	27
1.2.2.3	Vers une intégration des approches multi-risques dans la gestion des risques	28
1.3	Approche multi-risques en milieu urbain	30
1.3.1	La ville, un espace multi-risques	30
1.3.1.1	La ville, lieu vulnérable	30
1.3.1.2	La ville, exposée à des aléas divers	33
1.3.2	La nécessité d'étudier les risques en milieu urbain	36
1.3.2.1	L'augmentation du nombre de catastrophes naturelles?	36
1.3.2.2	L'absence de culture et de mémoire des risques	38
1.3.3	Étudier les risques à l'échelle infra-communale	39
1.4	Problématique générale	40
1.4.1	La connaissance au service de la gestion : mise en place de la problé- matique	40
1.4.2	Objectifs	40
1.5	Conclusion du premier chapitre	41
2	Démarche pluridisciplinaire d'étude des interactions entre risques sis- mique et technologiques	43
2.1	Évaluation du risque sismique à l'échelle infra-communale	44
2.1.1	Évaluation de l'aléa sismique	44
2.1.2	Variabilité des effets d'un séisme à l'échelle infra-communale : les effets de site	46
2.1.2.1	Définition	46
2.1.2.2	Méthodes d'estimation des effets de site	49
2.1.2.3	Estimation des effets de site à l'aide de la méthode de H/V	52
2.1.2.4	Estimation des effets de site à l'aide de la méthode des fonctions récepteurs	57
2.1.2.5	Correspondance entre les fréquences mesurées et les fré- quences théoriques	60

2.1.2.6	Interpolation des valeurs de fréquences fondamentales . . .	60
2.1.3	Simulation des effets d'un séisme	62
2.2	Caractérisation de l'aléa technologique	64
2.2.1	Exposition cumulée	66
2.2.2	Scénarios et réactions en chaîne	68
2.2.3	Intégration d'un gradient d'effets avec la distance au point source . .	68
2.2.4	Conclusion : méthodologie d'évaluation des aléas	70
2.3	Caractérisation de la vulnérabilité des éléments exposés	70
2.3.1	Évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments	73
2.3.1.1	L'EMS-98	73
2.3.1.2	Vulnérabilité physique aux tremblements de terre liée à la fréquence de résonance	74
2.3.2	Caractérisation de la vulnérabilité fonctionnelle des infrastructures .	78
2.3.2.1	Fonction principale d'un bâtiment ou d'une surface non construite	82
2.3.2.2	Établissements recevant du public (ERP), capacité d'ac- cueil et population sensible	83
2.3.2.3	Immeubles de grande hauteur (IGH)	84
2.3.2.4	Proposition de typologie de vulnérabilité fonctionnelle des infrastructures	85
2.3.3	Caractérisation de la vulnérabilité de la population	86
2.3.3.1	Prise en compte de la densité de population	86
2.3.3.2	Prise en compte de la représentation cognitive du risque par la population	88
2.3.4	Vulnérabilité totale	95
2.3.5	Conclusion : méthodologie de caractérisation de la vulnérabilité . . .	98
2.4	Interactions entre risques sismique et technologiques	98
2.4.1	SIG et risque sismique	98
2.4.2	SIG et risques technologiques	99
2.4.3	Analyse des interactions entre risques	100

2.4.3.1	Interactions entre risques sismique et technologiques	101
2.4.3.2	Interactions entre risques technologiques	101
2.5	Données	104
2.5.1	Données nécessaires	104
2.5.1.1	Données portant sur l'aléa sismique	104
2.5.1.2	Données en lien avec l'aléa technologique	105
2.5.1.3	Données portant sur la vulnérabilité des éléments exposés	105
2.5.1.4	Données diverses	106
2.5.2	Données disponibles	108
2.5.3	Données collectées	108
2.5.4	Données à créer	109
2.5.5	Qualité des données, incertitudes des résultats	109
2.5.5.1	Incertitudes liées au modèle	111
2.5.5.2	Incertitudes liées aux données	112
2.5.5.3	Incertitudes liées aux résultats	115
2.5.6	Des données hétérogènes nécessitant des traitements dans l'objectif d'une intégration dans le SIG	116
2.5.6.1	Différence de couverture des données	116
2.5.6.2	Systèmes de coordonnées différents	116
2.5.6.3	Niveau de détail trop élevé	116
2.5.6.4	Différence d'organisation des données	117
2.5.6.5	Différences d'échelles d'acquisition et de richesse attributaire	117
2.6	Le SIG multi-risques	118
2.6.1	SIG et risques majeurs	118
2.6.2	Avantages du SIG pour l'étude des risques	120
2.6.3	Structuration des données dans le SIG	120
2.6.4	Le SIG multi-risques comme outil d'aide à la décision	122
2.7	Conclusion du deuxième chapitre	124

3 Connaître pour mieux gérer : application à l'agglomération de Mulhouse 127

3.1	Mulhouse, agglomération multi-risques : présentation du contexte général . . .	127
3.1.1	Un contexte tectonique favorable à l'occurrence de séismes, des conditions géologiques susceptibles d'en aggraver les effets	130
3.1.2	Aléas naturels et sismicité de la zone d'étude	133
3.1.3	Les origines et l'histoire industrielle de Mulhouse, genèse des risques contemporains technologiques	134
3.1.4	Des menaces d'origine anthropique localisées dans l'agglomération, d'autres plus excentrées	136
3.1.5	Une agglomération vulnérable	138
3.1.6	Une prise de conscience des autorités mulhousiennes face à une méconnaissance des risques de la part de la population	139
3.2	Risques sismique et technologiques dans l'agglomération mulhousienne . . .	141
3.2.1	Risque sismique	142
3.2.1.1	Effets de site	142
3.2.1.2	Simulation des effets d'un séisme de magnitude 6.0	162
3.2.2	Aléa technologique dans l'agglomération mulhousienne	168
3.2.2.1	Exposition cumulée	168
3.2.2.2	Prise en compte d'un gradient des effets avec la distance au point source	172
3.2.3	Conclusion de l'étude des aléas	176
3.2.4	Vulnérabilité	177
3.2.4.1	Vulnérabilité du bâti	177
3.2.4.2	Vulnérabilité de la population	183
3.2.4.3	Vulnérabilité totale	195
3.2.5	Interactions entre risques sismique et technologiques	196
3.2.5.1	Risque sismique	196
3.2.5.2	Risques technologiques	201
3.2.5.3	Interactions entre risques	205
3.2.6	Gestion des risques dans l'agglomération de Mulhouse	210

Conclusion générale et perspectives	213
Bibliographie	217
Table des matières	231
Table des figures	238
Liste des tableaux	243
Annexes	247

Table des figures

1.1	Définition du risque : Arequipa (Pérou), au pied du volcan El Misti	13
1.2	Exemple d'exercice d'évacuation dans une école primaire de Tokyo	21
1.3	Différence entre étude sectorisée et étude intégrée	25
1.4	Différents cas d'interactions entre catastrophes	26
1.5	Dégâts causés par un incendie sur un réservoir de naphte, dans la raffinerie de Tüpras, suite au séisme d'Izmit en 1999	27
1.6	Approches mono-sectorielles, pluri-sectorielles et multi-risques	28
1.7	Études mono-sectorielles, sectorisées, intégrées, multi-risques	28
1.8	Exercice PPI autour de l'usine Rhodia, le 24 novembre 2004	29
1.9	Évolution des populations urbaine et rurale entre 1950 et 2030 (prévision) des pays développés et en voie de développement	31
1.10	Quartier résidentiel avoisinant l'usine Rhodia-Dornach, à Mulhouse (Haut-Rhin), établissement classé "Seveso seuil haut"	32
1.11	Coût généré par les catastrophes (toutes confondues) par an entre 1900 et 2005	33
1.12	Nombre de catastrophes industrielles par an entre 1900 et 2005	34
1.13	Nombre de catastrophes naturelles par an entre 1900 et 2004	37
2.1	Dommmages supportés par la commune de Rognes suite au séisme de Lambesc (11 juillet 1909, $I_o = IX$)	46
2.2	Effets de site géologiques	47
2.3	Effet de site topographique	47
2.4	Variabilité spatiale des dommages à la suite du séisme d'Izmit (Turquie, 17 août 1999 ; $M_W = 7.4$)	48

2.5	Exemple de rapport spectral	50
2.6	Figure théorique d'emboîtement des maillages	53
2.7	Station mobile d'enregistrement du bruit sismique ambiant	54
2.8	Étapes de traitement des mesures de bruit	55
2.9	Exemples de spectres auxquels on a attribué des indicateurs de qualité différents	58
2.10	Exemple de station sismique temporaire	59
2.11	Exemple théorique de cumul quantitatif : superposition de plusieurs enveloppes	67
2.12	Exemple théorique de cumul qualitatif : superposition d'une enveloppe "toxique" et d'une enveloppe "thermique"	67
2.13	Gradients des effets en fonction de la distance (schéma théorique)	68
2.14	Méthodologie d'évaluation des aléas sismique et technologiques	70
2.15	Différentes manières de classer les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité	71
2.16	Schéma théorique d'un bâtiment	77
2.17	Camions de pompiers détruits lors du séisme de Bam (26 décembre 2003, $M_W = 6.5$)	79
2.18	Exemple de quartier où la densité de population a été ramenée à la surface bâtie	87
2.19	Méthodologie de caractérisation de la vulnérabilité du bâti et de la population	98
2.20	Procédure d'analyse des interactions entre risques sismique et technologiques	101
2.21	Schéma théorique de plusieurs scénarios d'accidents	102
2.22	Schéma des réactions en chaîne potentielles dans le cas théorique représenté sur la figure 2.21	103
2.23	Cycle de vie d'une information dans les étapes de modélisation géographique	111
2.24	Précision inégale entre les données de bâti du cadastre et celles de la BD Topo®	113
2.25	Attribut hauteur d'un ensemble de bâtiments, selon la BD Topo®	113
2.26	Localisation différente des limites de communes et des limites d'IRIS	114
2.27	Données de bâti représentées par plusieurs couches superposées, dans la BD Topo®	117
2.28	Couche de bâti après regroupement de plusieurs couches de la BD Topo® et table d'attributs associée	118

2.29	Structuration des données dans le SIG	121
2.30	Les trois phases de la gestion des risques	122
3.1	Communes concernées par cette étude	128
3.2	Contexte naturel : topographie et hydrographie de la zone d'étude	129
3.3	Contexte tectonique de l'Europe Centrale (G. Lopez-Cardozo)	130
3.4	Carte géologique des Vosges, du Fossé Rhénan et de la Forêt-Noire	131
3.5	Carte géologique de l'agglomération de Mulhouse	132
3.6	Représentation du séisme de Bâle (18 octobre 1356, $I_o = IX-X$)	134
3.7	Sismicité historique et instrumentale du Fossé Rhénan	135
3.8	Fabrique d'indiennes et filature de M. Schlumberger Grosjean et C ^o , à Mulhouse	136
3.9	Sites technologiques dangereux et axes de transport de matières dangereuses dans l'agglomération mulhousienne	137
3.10	Principaux éléments vulnérables de la zone d'étude	140
3.11	Localisation des point de mesures de bruit sismique	143
3.12	Localisation des stations sismiques temporaires	144
3.13	Exemples de spectres obtenus par la méthode de Nakamura et par celle des fonctions récepteurs aux stations temporaires	146
3.14	Carte des fréquences fondamentales de la région de Mulhouse (méthode de Nakamura et fonctions récepteurs)	147
3.15	Histogrammes des valeurs de fréquence fondamentale de la région de Mulhouse (méthode de Nakamura).	148
3.16	Rapports H/V des points 947 et 980	149
3.17	Rapports H/V des points 887 et 923	150
3.18	Distribution des valeurs de la fréquence fondamentale selon la géologie de surface caractéristique de chaque site	151
3.19	Rapport H/V du site 114 (L4C)	152
3.20	Interpolation par krigeage des valeurs de fréquence fondamentale estimées à partir de la méthode de Nakamura	155
3.21	Facteurs d'amplification obtenus par la méthode de Nakamura	156

3.22	Influence de l'heure et du jour sur l'allure des rapports spectraux (méthode de Nakamura)	157
3.23	Rapport H/V de bruit de la station THA	158
3.24	Partition de l'espace en zones homogènes d'effets de site	160
3.25	Localisation des failles actives du sud du Fossé Rhénan	163
3.26	Simulation des effets d'un séisme : accélérations attendues pour un séisme de magnitude 6.0 dont l'épicentre serait localisé sur la faille d'Illfurth	164
3.27	Simulation des effets d'un séisme : accélérations attendues pour un séisme de magnitude 6.0 dont l'épicentre serait localisé sur la faille d'Allschwil . . .	165
3.28	Accélérations attendues selon le premier scénario et zones d'effets de site homogènes	166
3.29	Extension spatiale (enveloppes) des scénarios d'accidents redoutés dans l'agglomération mulhousienne	169
3.30	Exposition cumulée : nombre d'enveloppes superposées (tous effets confondus)	170
3.31	Exposition cumulée à l'effet toxique	171
3.32	Cumul qualitatif : différentes combinaisons d'effets	173
3.33	Carte d'aléa technologique	174
3.34	Exemple de prise en compte de la distance pour deux scénarios à effets redoutés de type "surpression"	176
3.35	Estimation de la fréquence de résonance des bâtiments	179
3.36	Vulnérabilité physique des bâtiments aux tremblements de terre	180
3.37	Vulnérabilité fonctionnelle du bâti et établissements recevant du public . . .	182
3.38	Représentation en trois dimensions des IGH	183
3.39	Densités de population ramenées à la surface de l'îlot, de l'IRIS ou du territoire communal	184
3.40	Densités de population ramenées à la surface bâtie et par bâtiment	185
3.41	Indices synthétiques de vulnérabilité aux séismes et aux aléas technologiques	192
3.42	Représentation cartographique de l'indice de vulnérabilité sismique, calculé à partir de la relation 2.10	193
3.43	Représentation cartographique de l'indice de vulnérabilité technologique, calculé à partir de la relation 2.10	194
3.44	Vulnérabilité totale du bâti de l'agglomération mulhousienne	197

3.45	Carte de croisement entre l'amplification des ondes et la vulnérabilité physique du bâti	198
3.46	Carte de croisement entre l'amplification des ondes et la vulnérabilité fonctionnelle du bâti	199
3.47	Carte de croisement entre l'amplification des ondes et la densité de population ramenée à l'espace bâti	200
3.48	Risques technologiques sur l'agglomération mulhousienne	203
3.49	Aléa technologique réel et sentiment d'exposition des enquêtés par rapport aux sites industriels dangereux	204
3.50	Interactions entre risques sismique et technologiques sur le site de Rhodia	205
3.51	Amplification et enveloppes de scénarios d'accidents industriels	206
3.52	Schéma des réactions en chaîne potentielles entre scénarios d'accidents technologiques	209
3.53	Effets dominos potentiels en cas d'occurrence du scénario 21	210

Liste des tableaux

1.1	Échelle des événements selon le nombre de victimes, les pertes financières et les pertes de biomasse	18
2.1	Classification des méthodes instrumentales d'estimation des effets de site . .	49
2.2	Typologie du bâti pour l'application des normes parasismiques PS-92	81
2.3	Catégories d'établissements recevant du public en fonction de leur capacité d'accueil	84
2.4	Proposition de typologie de la vulnérabilité fonctionnelle du bâti	85
2.5	Proposition de typologie de la vulnérabilité fonctionnelle des surfaces non construites	85
2.6	Densités obtenues pour les trois îlots représentés sur la figure 2.18 suivant les deux méthodes	87
2.7	Facteurs influençant la vulnérabilité d'un individu	90
2.8	Facteurs retenus pour la construction de l'indice de vulnérabilité de la population	94
2.9	Niveaux de vulnérabilité selon la fonction et la hauteur du bâtiment	96
2.10	Clé de détermination du risque à cinq niveaux	99
2.11	Réactions en chaîne potentielles pour chaque scénario (cas théorique de la figure 2.21)	102
2.12	Extrait de la sismicité historique du Fossé Rhéna	104
2.13	Ensemble des données sélectionnées pour l'étude des interactions entre risques sismique et technologique	107
2.14	Données utilisées pour l'habillage et le repérage	108
2.15	Inventaire des données collectées auprès de différents organismes	109
2.16	Descriptif des données collectées (extrait)	110

3.1	Caractéristiques des séismes pris en compte pour le calcul des rapports spectraux	144
3.2	Fréquences fondamentales et facteurs d'amplification obtenus aux stations temporaires par les méthodes de Nakamura et des fonctions récepteurs . . .	145
3.4	Forage 04136X0006 : épaisseur, lithologie, stratigraphie des différentes couches	152
3.5	Intensité au point source de chaque scénario	175
3.6	Attributs de vulnérabilité fonctionnelle du bâti adaptés aux données disponibles	181
3.7	Minimum et maximum de densité de population obtenus par les deux méthodes	185
3.8	Connaissance des consignes de sécurité à suivre en cas de catastrophe naturelle ou d'accident industriel (Q18)	190
3.9	Risques auxquels les individus enquêtés se sentent exposés, selon leur groupe d'appartenance	191
3.10	Récapitulatif des réactions en chaîne potentielles entre scénarios d'accidents technologiques	208

Annexes

Liste des annexes

Annexe 1 : liste des sigles et acronymes

Annexe 2 : glossaire

Annexe 3 : échelle macrosismique européenne (EMS-98)

Annexe 4 : typologie du bâti établie dans le cadre du programme ALARM

Annexe 5 : types et catégories d'établissements recevant du public

Annexe 6 : maillages théoriques des mesures de bruit sismique

Annexe 7 : localisation des forages

Annexe 8 : exemples de spectres rejetés en raison de leur mauvaise qualité

Annexe 9 : description des scénarios d'accident susceptibles de se produire sur les sites technologiques dangereux

Annexe 10 : facteurs de la représentation cognitive des risques selon R. D'Ercole

Annexe 11 : facteurs augmentant ou diminuant la perception des risques par la population, selon A. Dauphiné

Annexe 12 : questionnaire de l'enquête de représentation cognitive des risques par la population

Annexe 13 : composition de l'échantillon de population enquêtée

Annexe 14 : principaux résultats de l'enquête de représentation cognitive des risques par la population

Annexe 1 : liste des sigles et acronymes

ADEME : agence de l'environnement et de maîtrise de l'énergie.

APE : activité principale exercée.

BLEVE : boiling liquid expanding vapour explosion (vaporisation explosive d'un liquide porté à ébullition).

BRGM : bureau de recherches géologiques et minières.

BSS : banque de données du sous-sol.

CAMSA : communauté d'agglomération Mulhouse Sud Alsace.

CEA : commissariat à l'énergie atomique.

CRED : centre de recherches sur l'épidémiologie des désastres.

DCS : dossier communal synthétique.

DDE : direction départementale de l'équipement.

DDRM : dossier départemental sur les risques majeurs.

DICRIM : dossier d'information communal sur les risques majeurs.

DIREN : direction régionale de l'environnement.

DRIRE : direction régionale de l'industrie, de la recherche et de l'environnement.

EMS-98 : european macroseismic scale (échelle macrosismique européenne).

ERP : établissement recevant du public.

ICPE : installation classée pour la protection de l'environnement.

IGH : immeuble de grande hauteur.

IRMa : institut des risques majeurs.

INERIS : institut national de l'environnement et des risques.

IRIS : îlots regroupés pour l'information statistique.

IRSN : institut de radioprotection et de sûreté nucléaire.

ISDR : internation strategy for disaster reduction (stratégie internationale pour la prévention des catastrophes).

LGRB : Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (office pour la géologie au niveau du "Land").

MATE : ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement.

METL : ministère de l'équipement, des transports et du logement.

MOCAMU : mobilisation catastrophe Mulhouse.

OFDA : office américain d'assistance internationale aux catastrophes.

PCS : professions et catégories socio-professionnelles.

PEGAS : plan d'entraide générale et d'assistance aux secours.

PGA : peak ground acceleration (accélération maximale du sol).

PLU : plan local d'urbanisme.

POS : plan d'occupation des sols.

PPI : plan particulier d'intervention.

PPR : plan de prévention des risques.

PPRT : plan de prévention des risques technologiques.

PSS : plan de surfaces submersibles.

PZIF : plan de zones sensibles aux incendies de forêts.

RéNaSS : réseau national de surveillance sismique.

RF : receiver function (fonctions récepteurs).

SASW : spectral analysis of surface waves.

SMHV : séisme maximal historiquement vraisemblable.

SMS : séisme majoré de sécurité.

SIRENE : système informatique répertoriant les entreprises et les établissements.

SSR : standard spectral ratio (rapport spectral standard).

TMD : transport de matières dangereuses.

VCE : mécanismes d'une explosion de gaz et/ou vapeurs combustibles.

ZOLERI : zone limite des effets irréversibles

Annexe 2 : glossaire

Aléa : phénomène destructeur observé, caractérisé par une probabilité d'occurrence, qui est l'inverse de sa période de retour, une extension spatiale et une intensité.

Apodisation de Hanning : traitement opéré sur un signal et ayant pour objectif de diminuer les effets de bord liés au découpage de celui-ci. L'apodisation consiste à multiplier le signal par une fenêtre type, dont il existe plusieurs formes, comme celle de Hanning, par exemple.

Bassin de risque : entité géographique homogène soumise à un même phénomène.

Bruit macrosismique : phénomène global dont la source essentielle est la houle des océans.

Bruit microsismique : un phénomène local qui a pour origine le vent, relayé par les racines des arbres, et les autres phénomènes hydrologiques et atmosphériques, ainsi que l'activité anthropique.

Bruit sismique : vibrations continues du sol, enregistrables en tous points du globe. Il est composé par le bruit macrosismique et le bruit microsismique.

Cadereau : cours d'eau temporaire dont le niveau peut monter rapidement.

Catastrophe : occurrence d'un phénomène d'une intensité plus ou moins élevée et aux conséquences plus ou moins dramatiques sur les éléments exposés. La catastrophe correspond à la réalisation du risque.

Démarche intégrée : qui prend en compte les différentes composantes du risque (aléa et vulnérabilité).

Démarche mono-sectorielle : qui n'aborde qu'un seul type de risque.

Démarche multi-risques : qui étudie différents risques simultanément et appréhende leurs interactions.

Démarche pluri-sectorielle : qui étudie plusieurs risques différents, mais les uns indépendamment des autres.

Démarche sectorisée : démarche centrée sur une composante du risque (aléa ou vulnérabilité).

Distance des effets redoutés : distance indiquée par l'étude de danger et définissant la zone d'effets irréversibles, également appelée ZOLERI ou Z2.

Effets redoutés : dans le cadre d'un aléa technologique, les effets redoutés sont de trois types : thermique, toxique, de surpression.

Éléments exposés : ensemble des éléments soumis à un danger. Il s'agit de la population, des bâtiments et des autres infrastructures humaines (réseaux de communication, réseaux de transports...), des activités humaines (économiques, de loisirs, de service...) et du patrimoine culturel et environnemental (monuments, paysages, biodiversité...).

Enveloppe : extension spatiale des effets redoutés d'un accident technologique potentiel.

Etude de danger (ou étude des dangers ou étude de dangers) : étude élaborée par un exploitant, décrivant en détails les installations de l'établissement en vue d'identifier précisément les risques internes et externes à l'établissement, de les évaluer par des scénarios d'accidents envisageables, de concevoir les mesures à même de les réduire et de recenser les moyens de secours disponibles en cas de sinistre (source : DRIRE. www.drire.gouv.fr).

Eurocodes 8 : normes européennes de conception et de dimensionnement des structures pour leur résistance aux séismes.

Exposition : le fait d'être soumis aux effets redoutés et potentiels d'une source de danger.

Fenêtre temporelle : portion d'un signal enregistré (dans notre cas, une fenêtre temporelle de bruit sismique a une longueur de 8 192 points, ce qui équivaut à 65.536 s avec une fréquence d'échantillonnage de 125 Hz).

Foyer : point de départ de la rupture des roches.

Intensité macrosismique : notée I_o , dont les valeurs entières s'échelonnent de I à XII, l'intensité est déterminée en fonction des dommages engendrés par le(s) séisme(s).

Loi d'atténuation des ondes sismiques : lois empiriques ou semi-empiriques qui visent à relier, à certaines fréquences ou sur une bande de fréquence définie, le mouvement (déplacement, vitesse ou accélération) maximum du sol en fonction de la magnitude du séisme, de la distance source-site observé et, dans certains cas, de la géologie au niveau du point d'observation.

Magnitude d'un séisme : la magnitude représente l'énergie dégagée au foyer, notée M , dont les valeurs s'écrivent en chiffres arabes sur une échelle ouverte.

Microzonage sismique : zonage sismique à l'échelle d'une commune ou d'une agglomération, prenant en compte les effets de site et les effets induits.

Moment sismique : grandeur physique permettant de caractériser la taille d'un séisme. Il est plus spécifiquement utilisé pour les séismes de magnitude élevée, pour lequel les magnitudes M_L , m_B ou M_S saturent (elles n'augmentent plus, bien que l'énergie du séisme, elle, continue à croître). Le moment sismique est calculé à partir du spectre des enregistrements des ondes sismiques, alors que la magnitude est déterminée à partir des sismogrammes

Ondes S : ondes secondaires, appelées aussi ondes de cisaillement ou ondes transversales, qui apparaissent en second sur les sismogrammes. À leur passage, les mouvements du sol s'effectuent perpendiculairement au sens de propagation de l'onde (source : documents pédagogiques EOST).

Ondes SH : décomposition des ondes S dont la direction de vibration est perpendiculaire au plan d'incidence (plan contenant la verticale et la direction de propagation des ondes S).

Ondes SV : décomposition des ondes S dont la direction est dans le plan d'incidence.

Perception : "ensemble des mécanismes et des processus par lesquels l'organisme prend connaissance du monde et de son environnement sur la base des informations élaborées par ses sens" [Cauvin, 1984].

Point source : réservoir, cuve, fût qui contient la(les) substance(s) dangereuse(s) et qui sera le point de départ d'un accident technologique.

Population mère : ensemble des éléments sur lesquels porte une enquête.

Récepteur DCF : récepteur du signal radio DCF77, émis à Francfort (Allemagne). Le signal indique l'heure sous forme codée.

Représentation cognitive : résultat d'une perception, mais également de croyances, d'informations indirectes, différées, inconscientes. La représentation cognitive ne nécessite pas une connaissance précise de l'objet et n'implique pas de l'avoir vu ou "perçu" par un autre sens, d'être en sa présence.

Résilience : capacité d'un système ou d'une partie de ce système à absorber l'occurrence d'une catastrophe [Timmerman, 1981].

Risque : combinaison d'un aléa et d'une vulnérabilité.

Risque majeur : risque caractérisé par une faible occurrence et une gravité importante, engendrant un nombre élevé de victimes et de nombreux dommages matériels et environnementaux.

Risques technologiques : regroupent les risques industriels, de rupture de barrage, nucléaire et de transport de matières dangereuses.

Scénario : scénario d'accident industriel potentiel, décrit par l'étude de danger.

Vulnérabilité fonctionnelle : "propension d'un élément à avoir des pertes de fonctionnalités" [Minciardi *et al.*, 2005]. Dans notre cas, la vulnérabilité fonctionnelle d'un bâtiment est basée sur sa fonction et sur son rôle dans la gestion d'une crise.

Vulnérabilité physique : taux d'endommagement potentiel des éléments exposés. Dans le cadre de ce travail, la vulnérabilité physique

Vulnérabilité totale : dans notre cas, vulnérabilité synthétisant les vulnérabilités physique, fonctionnelle (hauteur et fonction principale) et la densité de population. La vulnérabilité totale est ramenée à l'échelle du bâtiment.

Annexe 3 : échelle macrosismique européenne (EMS-98)

Source du texte et des illustrations : G. Grunthal (dir.). L'Echelle Macrosismique Européenne - European Macroseismic Scale 1998. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, vol. 19, Ministère de la Culture, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche du Luxembourg, Conseil de l'Europe, 2001. 103 p.

Différenciation des structures (bâtiments) en classes de vulnérabilité

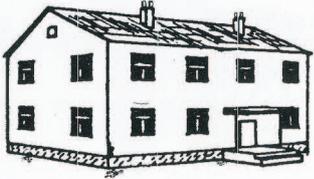
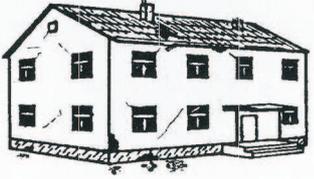
Type de structure	Classe de vulnérabilité					
	A	B	C	D	E	F
MAÇONNERIE	Moellon brut, pierre tout venant	○				
	Brique crue (adobe)	○—				
	Pierre brute	○	—			
	Pierre massive		○—	—		
	Non renforcée, avec des éléments préfabriqués		○—	—		
	Non renforcée, avec des planchers en béton armé			○—	—	
	Renforcée ou chaînée				○—	—
BÉTON ARMÉ	Ossature sans conception parasismique (CPS)			○—	—	
	Ossature avec un niveau moyen de CPS				○—	—
	Ossature avec un bon niveau de CPS					○—
	Murs sans CPS			○—	—	
	Murs avec un niveau moyen de CPS				○—	—
	Murs avec un bon niveau de CPS					○—
ACIER				○—	—	
BOIS				○—	—	

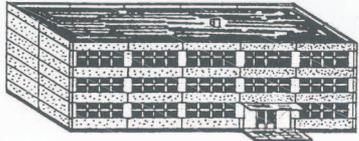
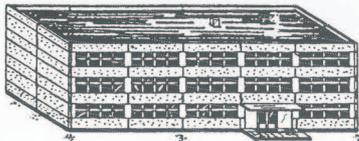
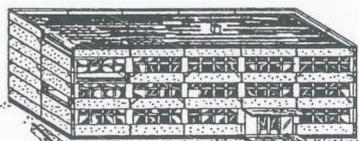
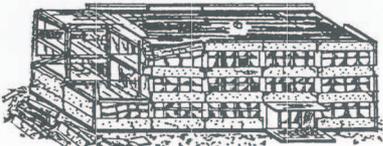
○ Classe de vulnérabilité la plus probable; — Intervalle probable;
 Intervalle de probabilité plus faible, cas exceptionnels

Il faut comprendre par type de structures en maçonnerie, par exemple, de la maçonnerie de pierres brutes, et par type de structures en béton armé, par exemple, une structure ou des murs en béton armé.

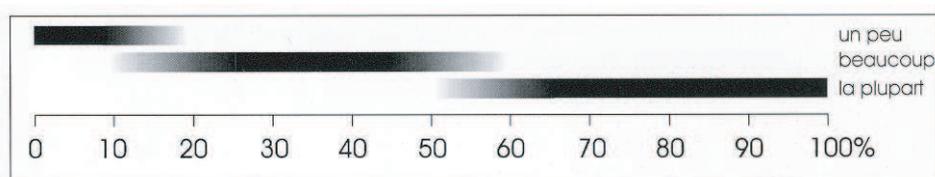
Classification des dégâts

La manière dont un bâtiment se déforme sous la charge d'un tremblement de terre dépend de sa nature. Pour une classification grossière, on peut regrouper les bâtiments en maçonnerie ainsi que les bâtiments en béton armé.

Classification des dégâts aux bâtiments en maçonnerie	
	<p>Degré 1: Dégâts négligeables à légers (aucun dégât structural, légers dégâts non structuraux)</p> <p>Fissures capillaires dans très peu de murs. Chute de petits débris de plâtre uniquement. Dans de rares cas, chute de pierres descellées provenant des parties supérieures des bâtiments.</p>
	<p>Degré 2: Dégâts modérés (dégâts structuraux légers, dégâts non structuraux modérés)</p> <p>Fissures dans de nombreux murs. Chutes de grands morceaux de plâtre. Effondrement partiel des cheminées.</p>
	<p>Degré 3: Dégâts sensibles à importants (dégâts structuraux modérés, dégâts non structuraux importants)</p> <p>Fissures importantes dans la plupart des murs. Les tuiles des toits se détachent. Fractures des cheminées à la jonction avec le toit; défaillance d'éléments non structuraux séparés (cloisons, murs pignons).</p>
	<p>Degré 4: Dégâts très importants (dégâts structuraux importants, dégâts non structuraux très importants)</p> <p>Défaillance sérieuse des murs; défaillance structurale partielle des toits et des planchers.</p>
	<p>Degré 5: Destruction (dégâts structuraux très importants)</p> <p>Effondrement total ou presque total.</p>

Classification des dégâts aux bâtiments en béton armé	
	<p>Degré 1: Dégâts négligeables à légers (aucun dégât structural, légers dégâts non structuraux)</p> <p>Fissures fines dans le plâtre sur les parties de l'ossature ou sur les murs à la base. Fissures fines dans les cloisons et les remplissages.</p>
	<p>Degré 2: Dégâts modérés (dégâts structuraux légers, dégâts non structuraux modérés)</p> <p>Fissures dans les structures de types portiques (poteaux et poutres) et dans structures avec murs. Fissures dans les cloisons et les murs de remplissage; chute des revêtements friables et du plâtre. Chute du mortier aux jonctions entre les panneaux des murs.</p>
	<p>Degré 3: Dégâts sensibles à importants (dégâts structuraux modérés, dégâts non structuraux importants)</p> <p>Fissures dans les poteaux et dans les nœuds à la base de l'ossature et aux extrémités des linteaux des murs avec des ouvertures. Ecaillage du revêtement de béton, flambement des barres d'armature longitudinale. Fissures importantes dans les cloisons et les murs de remplissage, défaillance de certains panneaux de remplissage.</p>
	<p>Degré 4: Dégâts très importants (dégâts structuraux importants, dégâts non structuraux très importants)</p> <p>Fissures importantes dans les éléments structuraux avec défaillance en compression du béton et rupture des barres à haute adhérence; perte de l'adhérence barres-béton; basculement des poteaux. Eroulement de quelques poteaux ou d'un étage supérieur.</p>
	<p>Degré 5: Destruction (dégâts structuraux très importants)</p> <p>Effondrement total du rez-de-chaussée ou de parties de bâtiments.</p>

Définition des quantités



Définition des degrés d'intensité

Disposition de l'échelle :

- a) Effets sur les humains.
- b) Effets sur les objets et sur la nature.
- c) Dégâts sur les bâtiments.

Remarque préalable : les différents degrés d'intensité peuvent également comprendre les effets de degré(s) respectif(s) d'intensité plus faible, lorsque ces effets ne sont pas mentionnés explicitement.

I. Secousse imperceptible

- a) Non ressentie, même dans les circonstances les plus favorables.
- b) Sans effet.
- c) Aucun dégât.

II. Rarement perceptible

- a) La secousse n'est ressentie que dans des cas isolés ($< 1 \%$) par des personnes au repos dans des positions particulièrement réceptives, à l'intérieur des habitations.
- b) Sans effet.
- c) Pas de dégâts.

III. Faible

- a) La secousse est ressentie à l'intérieur des habitations par quelques personnes. Les personnes au repos ressentent une oscillation ou un léger tremblement.
- b) Les objets suspendus oscillent légèrement.
- c) Aucun dégât.

IV. Largement observée

- a) La secousse est ressentie à l'intérieur des habitations par de nombreuses personnes et n'est ressentie à l'extérieur que par un petit nombre. Quelques dormeurs sont réveillés. Le niveau des vibrations n'est pas effrayant. Les vibrations sont modérées. Les observateurs ressentent un léger tremblement ou une légère oscillation, de la pièce ou du lit, de la chaise, etc.
- b) La porcelaine, les verres, les fenêtres et les portes vibrent. Balancement des objets suspendus. Dans quelques cas, secousses visibles du mobilier léger. Les menuiseries craquent dans quelques cas.

c) Aucun dégât.

V. Fort

a) La secousse est ressentie à l'intérieur des habitations par la plupart des personnes et à l'extérieur par quelques personnes. Quelques personnes effrayées se précipitent dehors. Réveil de la plupart des dormeurs. Les observateurs ressentent une forte secousse ou une forte oscillation de l'ensemble du bâtiment, de la pièce ou du mobilier.

b) Balancement important des objets suspendus. La porcelaine et les verres s'entrechoquent. De petits objets, des objets dont le centre de gravité est élevé et/ou qui sont mal posés peuvent se déplacer ou tomber. Des portes ou des fenêtres s'ouvrent ou se ferment. Dans quelques cas, des vitres se brisent. Les liquides oscillent et peuvent être projetés hors des récipients pleins. Les animaux deviennent nerveux à l'intérieur.

c) Dégâts de degré 1 de quelques bâtiments de classes de vulnérabilité A et B.

VI. Dégâts légers

a) Secousse ressentie par la plupart des personnes à l'intérieur des habitations et par de nombreuses personnes à l'extérieur. Quelques personnes perdent leur sang-froid. De nombreuses personnes effrayées se précipitent dehors.

b) De petits objets de stabilité moyenne peuvent tomber et le mobilier peut être déplacé. Dans certains cas, bris de vaisselle et de verres. Les animaux d'élevage (même à l'extérieur) peuvent s'affoler.

c) De nombreux bâtiments des classes de vulnérabilité A et B subissent des dégâts de degré 1, quelques-uns des classes A et B subissent des dégâts de degré 3 ; quelques-uns de classe C subissent des dégâts de degré 1.

VII. Dégâts

a) La plupart des personnes sont effrayées et essaient de se précipiter dehors. De nombreuses personnes éprouvent des difficultés à se tenir debout, en particulier aux étages supérieurs.

b) Les meubles sont déplacés et les meubles dont le centre de gravité est élevé peuvent se retourner. Les objets tombent des étagères en grand nombre. Les récipients, les réservoirs et les piscines débordent.

c) De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité A subissent des dégâts de degré 3, quelques-uns de degré 4. De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré 2, quelques-uns de degré 3. Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré 2. Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 1.

VIII. Dégâts importants

a) La plupart des personnes éprouvent des difficultés à se tenir debout, même dehors.

b) Les meubles peuvent se renverser. Des objets comme les téléviseurs, les machines à écrire, etc. tombent par terre. Possibilité de déplacement, de rotation ou de renversement des pierres tombales. On peut observer des vagues sur un terrain très mou.

c) De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité A subissent des dégâts de degré 4, quelques-uns de degré 5. De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré 3, quelques-uns de degré 4. De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré 2, quelques-uns de degré 3. Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 2.

IX. Destructiions

a) Panique générale. Des personnes peuvent être projetées au sol.

b) De nombreux monuments et colonnes tombent ou sont vrillés. On peut observer des vagues sur un terrain mou.

c) De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité A subissent des dégâts de degré 5. De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré 4, quelques-uns de degré 5. De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré 3, quelques-uns de degré 4. De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 2, quelques-uns de degré 3. Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité E subissent des dégâts de degré 2.

X. Destructiions importantes

c) La plupart des bâtiments de la classe de vulnérabilité A subissent des dégâts de degré 5. De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré 5. De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré 4, quelques-uns de degré 5. De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 3, quelques-uns de degré 4. De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité E subissent des dégâts de degré 2, quelques-uns de degré 3. Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité F subissent des dégâts de degré 2.

XI. Catastrophe

c) La plupart des bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré 5. La plupart des bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré 4, beaucoup de degré 5. De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 4, quelques-uns de degré 5. De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité E subissent des dégâts de degré 3, quelques-uns de degré 4. De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité F subissent des dégâts de degré 2, quelques-uns de degré 3.

XII. Catastrophe généralisée

c) Tous les bâtiments des classes de vulnérabilité A, B et pratiquement tous ceux de la classe de vulnérabilité C sont détruits. La plupart des bâtiments des classes de vulnérabilité D, E et F sont détruits. Les effets du tremblement de terre ont atteint le maximum concevable.

Annexe 4 : typologie du bâti établie dans le cadre du programme ALARM

ALARM : 5e PCRD - Programme européen n°EVG1-2001-3018, "Assessment of landslide risk and mitigation in mountain areas" (2001-2004). Coordinateur scientifique : S. Silvano, CNR-URPI, Padova, Italie.

D'après les travaux réalisés dans le cadre du programme ALARM, plusieurs facteurs ont été considérés. Seuls les attributs "type", "sous-type" et "fonction" sont reportés ici (d'autres attributs portant sur le matériau de construction, la population, etc. avaient été pris en compte dans cette typologie).

Type :

- construction ;
- terrain aménagé.

Pour les constructions :

- *sous-type* : bâtiment, hangar, église, chapelle, station d'épuration, monuments, ruines ;
- *fonction* :
 - résidentielle ;
 - commerciale ;
 - industrielle et artisanale ;
 - agricole ;
 - lieux de culte ;
 - sportive et de loisirs ;
 - services privés ;
 - services publics :
 - ★ enseignement ;
 - ⇒ primaire ;
 - ⇒ secondaire ;
 - ⇒ supérieur ;
 - ★ administration ;
 - ★ services d'urgence.

Pour les terrains aménagés :

- *sous-type* : camping, aires de loisirs, pistes de ski, parking, cimetières ;
- *fonction* :
 - résidentielle ;
 - industrielle et artisanale ;
 - agricole ;
 - sportive et de loisirs ;
 - stationnement ;
 - lieux de culte.

Annexe 5 : types et catégories d'établissements recevant du public

Code de la construction et de l'habitation - articles réglementant les établissements recevant du public.

Art. R. 123-2. Pour l'application du présent chapitre, constituent des établissements recevant du public tous bâtiments, locaux et enceintes dans lesquels des personnes sont admises, soit librement, soit moyennant une rétribution ou une participation quelconque ou dans lesquels sont tenues des réunions ouvertes à tout venant ou sur invitation, payantes ou non. Sont considérées comme faisant partie du public toutes les personnes admises dans l'établissement à quelque titre que ce soit en plus du personnel.

Art. R. 123-19. Les établissements sont, en outre, quel que soit leur type, classés en catégories, d'après l'effectif du public et du personnel. L'effectif du public est déterminé, suivant le cas, d'après le nombre de places assises, la surface réservée au public, la déclaration contrôlée du chef de l'établissement ou d'après l'ensemble de ces indications. Les règles de calcul à appliquer sont précisées, suivant la nature de chaque établissement, par le règlement de sécurité. Pour l'application des règles de sécurité, il y a lieu de majorer l'effectif du public de celui du personnel n'occupant pas des locaux indépendants qui posséderaient leurs propres dégagements. Les catégories sont les suivantes :

- 1e catégorie : au-dessus de 1 500 personnes ;
- 2e catégorie : de 701 à 1 500 personnes ;
- 3e catégorie : de 301 à 700 personnes ;
- 4e catégorie : 300 personnes et au-dessous, à l'exception des établissements compris dans la 5e catégorie ;
- 5e catégorie : établissements faisant l'objet de l'article R. 123-14 dans lesquels l'effectif du public n'atteint pas le chiffre minimum fixé par le règlement de sécurité pour chaque type d'exploitation.

Article GN1 du règlement de sécurité incendie dans les ERP

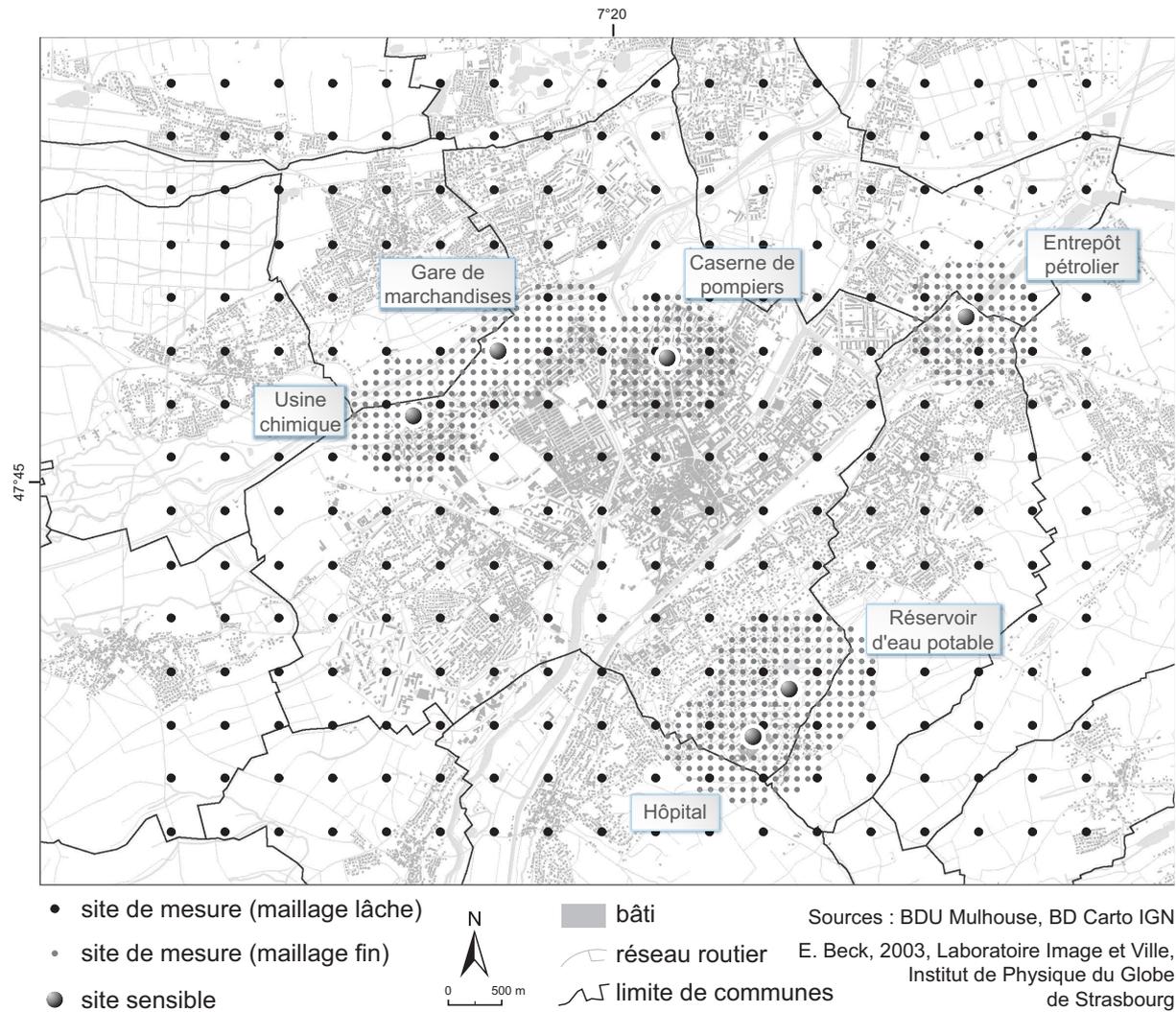
a) Établissements installés dans un bâtiment :

- J Structures d'accueil pour personnes âgées et personnes handicapées ;
- L Salles d'audition, de conférences, de réunions, de spectacles ou à usages multiples ;
- M Magasins de vente, centres commerciaux ;
- N Restaurants et débits de boissons ;
- O Hôtels et pensions de famille ;
- P Salles de danse et salles de jeux ;
- R Etablissements d'éveil, d'enseignement, de formation, centres de vacances, centres de loisirs sans hébergement ;
- S Bibliothèques, centres de documentation ;
- T Salles d'expositions ;
- U Etablissements sanitaires ;
- V Etablissements de culte ;
- W Administration, banques, bureaux ;
- X Etablissements sportifs couverts ;
- Y Musées.

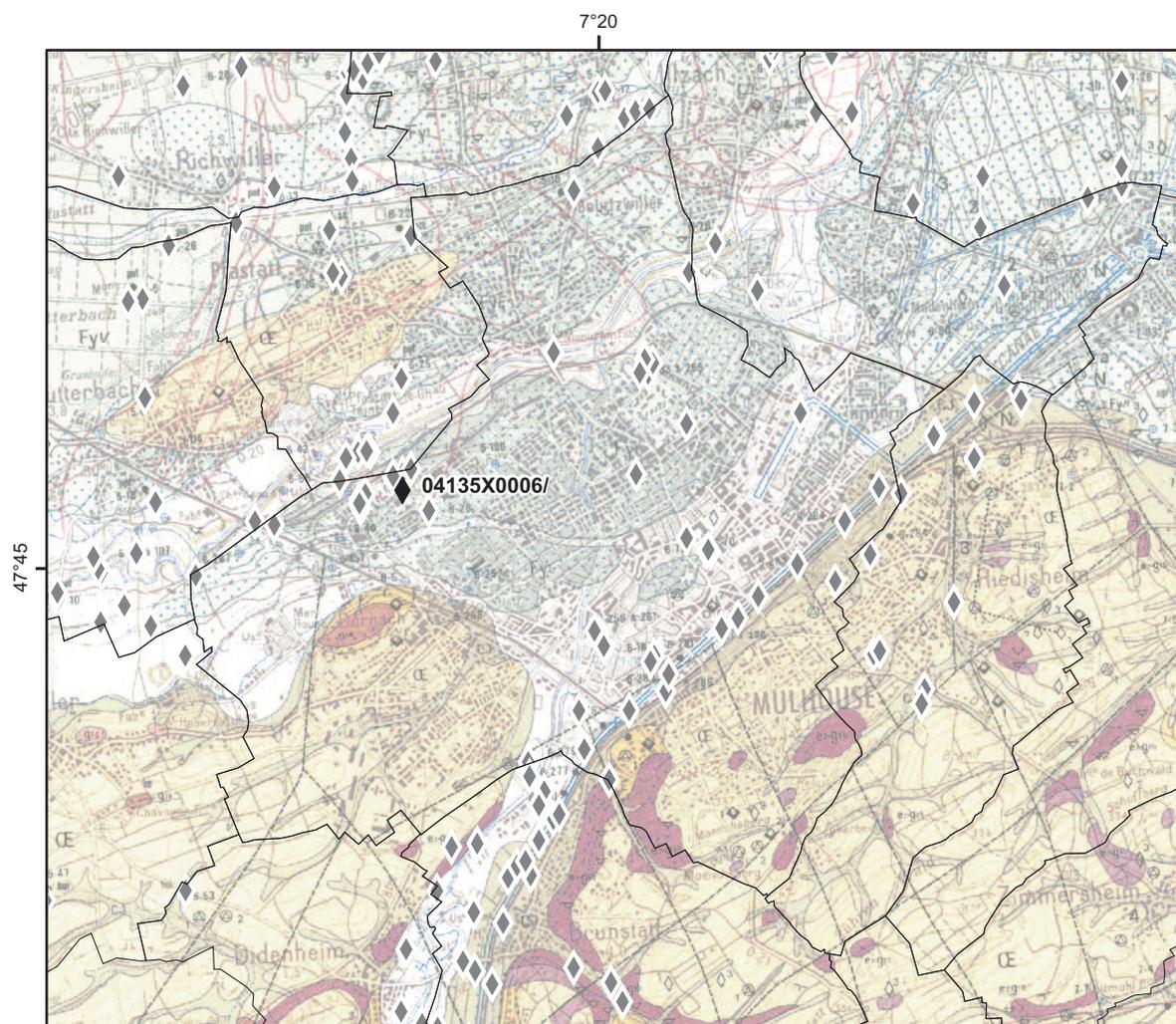
b) Établissements spéciaux :

- PA Etablissements de plein air ;
- CTS Chapiteaux, tentes et structures ;
- SG Structures gonflables ;
- PS Parcs de stationnement couverts ;
- GA Gares ;
- OA Hôtels-restaurants d'altitude ;
- EF Etablissements flottants ;
- REF Refuges de montagne.

Annexe 6 : maillages théoriques des mesures de bruit sismique



Annexe 7 : localisation des forages



◆ forage

— limite de communes



0 0,5 1 km

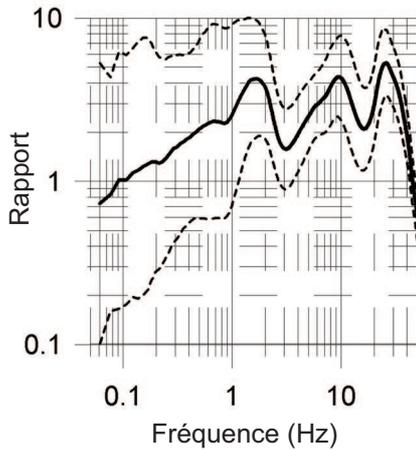
Sources : BD Carto, IGN,
BSS, BRGM,
Carte Géologique de France à 1/50 000
BRGM 2001 - Autorisation n°2004/039

E. Beck, 2006, Laboratoire Image et Ville,
Institut de Physique du Globe de Strasbourg

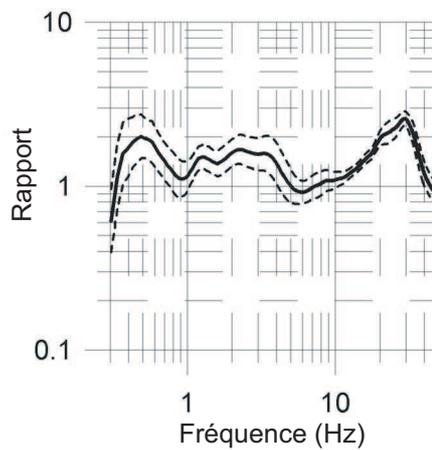
Source : banque du sous-sol (BRGM)

Annexe 8 : exemples de spectres rejetés en raison de leur mauvaise qualité (indicateur de qualité 5)

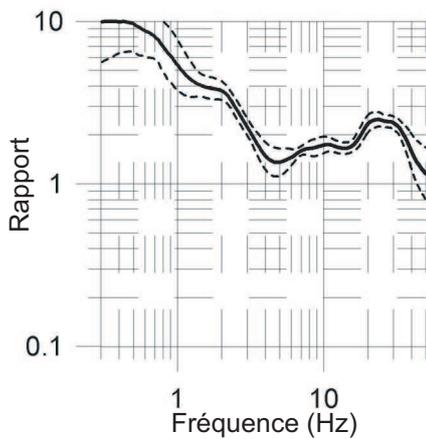
Ecart-type trop important



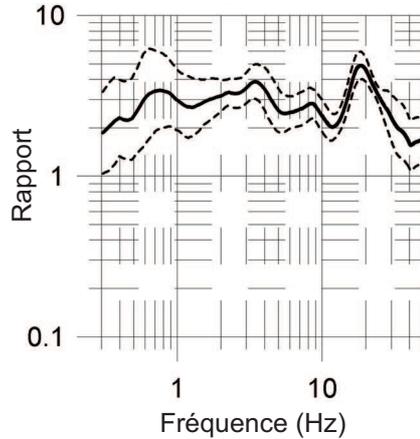
Pic dans des fréquences trop élevées



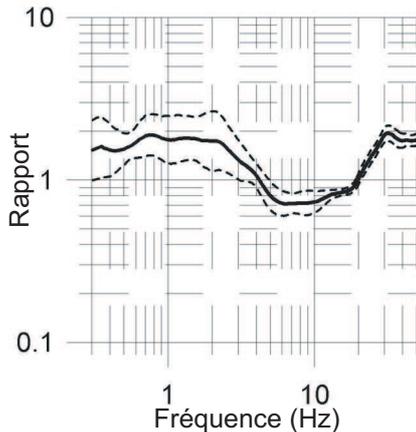
Montée dans les basses fréquences



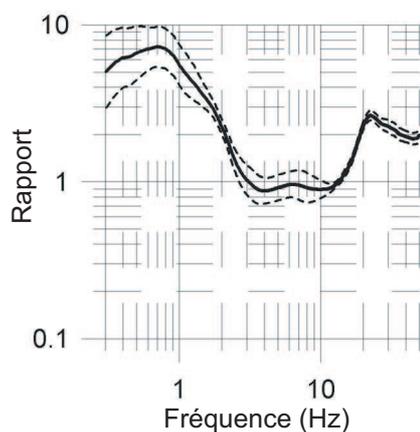
Pas de pic identifiable car trop de pics



Pas de pic identifiable



Pic dans des fréq. trop faibles par rapport aux caractéristiques du capteur (ici, L4C 1 Hz)



Annexe 9 : description des scénarios d'accident susceptibles de se produire sur les sites technologiques dangereux

ID	Distance (m)	Type d'effets	Entreprise
1	246	Toxique	Rhodia
2	53	Toxique	Rhodia
3	122	Toxique	Rhodia
4	128	Toxique	Rhodia
5	129	Toxique	Rhodia
6	97	Toxique	Rhodia
7	69	Toxique	Rhodia
8	5	Thermique	Rhodia
9	2	Thermique	Rhodia
10	1	Thermique	Rhodia
11	18	Thermique	Rhodia
12	24	Thermique	Rhodia
13	6	Thermique	Rhodia
14	6	Thermique	Rhodia
15	100	Thermique	Rhodia
16	1	Thermique	Rhodia
17	165	Surpression	Rhodia
18	31	Surpression	Rhodia
19	28	Thermique	TYM
20	880	Thermique	EPM
21	90	Thermique	EPM
22	150	Thermique	EPM
23	80	Thermique	EPM
24	130	Thermique	EPM
25	100	Thermique	EPM
26	105	Thermique	EPM
27	210	Surpression	EPM
28	210	Surpression	EPM
29	500	Thermique	Gare du Nord
30	1000	Toxique	Gare du Nord
31	4000	Toxique	Gare du Nord

La distance indiquée dans la deuxième colonne définit l'extension spatiale de la zone d'effets irréversibles (ZOLERI ou Z2).

Source : extraits des études de danger, DRIRE, 2004.

Annexe 10 : facteurs de la représentation cognitive des risques selon R. D'Ercole [D'Ercole, 1996]

Cas particulier du risque volcanique en Equateur (volcan Cotopaxi).

- variables de premier ordre :
 - perception ;
 - connaissances de moyens de protection ;
 - facteurs contraignants sociaux ;
- variables de deuxième ordre :
 - localisation :
 - ★ distance au volcan ;
 - ★ obstacles masquant le volcan ;
 - variables socio-économiques :
 - ★ niveau socio-économique ;
 - ★ activité professionnelle ;
 - ★ type de population ;
 - ★ sexe ;
 - ★ âge ;
 - ★ nombre de personnes dans le ménage ;
 - ★ temps de résidence ;
 - ★ niveau de confiance ;
 - information et source :
 - ★ connaissance de la catastrophe du Nevado del Ruiz ;
 - ★ source de l'information sur le volcan.

Annexe 11 : facteurs augmentant ou diminuant la perception des risques par la population, selon A. Dauphiné [Dauphiné, 2001]

Facteur	Modalité augmentant la perception	Modalité diminuant la perception
Potentiel catastrophique	Concentration dans le temps et l'espace	Dispersion spatio-temporelle
Familiarité	Non familier	Familier
Compréhension	Incompréhensible	Compréhensible
Incertitude	Incertitude scientifique	Certitude scientifique
Contrôle personnel	Incontrôlable	Contrôlable
Volonté d'exposition	Involontaire	Volontaire
Effets sur les enfants	Fort	Faible
Date des effets	Effets dilués	Effets immédiats
Effets sur les générations futures	Effets prévus	Effets non prévus
Identification des victimes	Victimes identifiées	Victimes statistiques
Terreur	Effets terrifiants	Effets non terrifiants
Effort des institutions	Institutions absentes	Institutions engagées
Médiatisation	Forte	Faible
Historique de l'accident	Fréquent	Rare ou inconnu
Equité	Impacts inéquitables	Impacts équitables
Bénéfices	Bénéfices inconnus	Bénéfices perçus
Réversibilité	Impacts irréversibles	Impacts réversibles
Implication personnelle	Forte	Faible
Origine	Bien attribuée	Incertaine (hasard)

Annexe 12 : questionnaire de l'enquête de représentation cognitive des risques par la population

La perception des risques

1

(Mulhouse)

Information à renseigner avant le début de l'enquête :

Date

Heure

N° d'enquête : vos initiales suivies du numéro d'ordre de votre enquête (exemple : Arthur MARTIN enquête n°25 = AM25)

Enquêteur

N° enquête

Lieu d'enquête

Bonjour, dans le cadre d'une étude portant sur la qualité de vie dans l'agglomération mulhousienne et réalisée par l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, nous aimerions vous poser quelques questions. Cette enquête est anonyme et dure une bonne vingtaine de minutes. Acceptez-vous d'y répondre ?

Q1 – Résidez-vous et/ou travaillez-vous quotidiennement dans la région de Mulhouse ? Depuis quand ?

Cochez la correspondante et renseignez la case de l'ancienneté.

	Oui	Depuis quand	commune
1. j'y habite			
2. j'y travaille			

Si la réponse est non, l'enquête s'arrête. Si la réponse est hors des communes concernées par notre enquête, le questionnaire est non valide, l'enquête peut s'arrêter.

Si la réponse est 1, dans les questions Q2, Q3, Q7, Q8, dire « habitez ».

Si la réponse est 2, dans les questions Q2, Q3, Q7, Q8, dire « travaillez ».

Q2 - Pouvez-vous localiser sur la carte l'endroit approximatif où vous habitez/travaillez?

Refus de répondre (à cocher si l'enquête n'a pas voulu répondre à cette question)



Adresse (n°, rue) :

Légende

-  réseau hydrographique
-  limite de communes
-  réseau routier
-  réseau ferré
-  églises

BECK E., 2004

Source: Bd Topo (IGN),
cadastre de Mulhouse (CAMSA)



Q3 - Pourquoi habitez-vous / travaillez-vous ici ?

Vous pouvez cocher plusieurs cases (3 au maximum). Ne pas citer les réponses.

Habitant	<input type="checkbox"/> 1. J'ai toujours habité là	Travailleur	<input type="checkbox"/> 1. J'ai toujours habité là
	<input type="checkbox"/> 2. Proximité d'un bon lycée, école, collège		<input type="checkbox"/> 2. Bonne qualité de l'air
	<input type="checkbox"/> 3. Bonne qualité de l'air		<input type="checkbox"/> 3. Proximité des commerces et des transports
	<input type="checkbox"/> 4. Coût		<input type="checkbox"/> 4. Sécurité du quartier
	<input type="checkbox"/> 5. Proximité des commerces et des transports		<input type="checkbox"/> 5. Proximité de la frontière
	<input type="checkbox"/> 6. Sécurité du quartier		<input type="checkbox"/> 6. Proximité du lieu d'habitat
	<input type="checkbox"/> 7. Proximité de la frontière		<input type="checkbox"/> 7. Qualité du travail
	<input type="checkbox"/> 8. Proximité du lieu de travail		<input type="checkbox"/> 8. Autre
	<input type="checkbox"/> 9. Qualité de la vie		
	<input type="checkbox"/> 10. Autre		

Les questions qui vont suivre portent sur votre sentiment général concernant la qualité de vie.

Q4 – De manière générale, quels sont les problèmes de société qui vous préoccupent le plus ?

Tâcher d'en faire citer au moins 3 et 5 au maximum

1 -..... 4 -.....
 2 -..... 5 -.....
 3 -.....

Q5 – Avant de poser la question, présenter la plaquette n°1 à l'enquêté.

Voici une liste de problèmes de société. Trouvez-vous chacun d'entre eux très préoccupant, plus ou moins préoccupant, pas du tout préoccupant ?

Cocher la case correspondant à la réponse de l'enquêté.

Si l'enquêté ne sait pas ou ne souhaite pas répondre, écrire NSP à droite du tableau, à la question correspondante.

PLAQUETTE N°1				Ordre
	Très préoccupant	Plus ou moins	Pas du tout	
Les accidents de la route				
Les risques alimentaires (OGM, listériose, vache folle...)				
Les toxicomanies (tabagisme, alcoolisme, drogue)				
La dégradation de l'environnement (effet de serre, déforestation, pluies acides...)				
Les conflits armés				
La misère et l'exclusion				
Les catastrophes naturelles				
La pollution (air, eau, sol)				
Le terrorisme				
Le chômage				
Les maladie graves (SIDA, cancer)				
Le risque nucléaire				
Les catastrophes industrielles				
L'insécurité				

Pouvez –vous classer par ordre d'importance les 3 problèmes les plus préoccupants pour vous ?

Q6 – Notre enquête est plus particulièrement orientée sur les risques. Pour vous, qu'est-ce qu'un risque ? Définissez en donnant 2 ou 3 mots ou donnez les 2-3 mots qui vous viennent à l'esprit lorsqu'on parle de risque.

Si l'enquêté donne plus de 3 mots, noter tout.

-
 - ne sais pas
 -

Q7 – Cette question fait référence aux risques auxquels l'enquêté(e) se sent exposé(e) sur le lieu de l'enquête (ou dans la commune où il/elle habite si elle appartient à la région de Mulhouse).

Citez les risques auxquels vous vous sentez, vous, personnellement, le plus exposé(e) sur votre lieu de travail / d'habitat ? Il n'est pas nécessaire de se référer à la liste précédente.

Tâcher d'en faire citer au moins 3 et 5 au maximum.

- 1 - 4. -
 2 - 5 -
 3 -

Q8 – Avant de poser la question, présenter la plaquette n°2.

Voici une liste de différents risques. Comment vous sentez-vous personnellement exposé(e) à chacun d'entre eux, sur votre lieu de travail / d'habitat ? Beaucoup, plus ou moins, pas du tout ?

Cocher la case correspondant à la réponse de l'enquêté.

Si l'enquêté(e) ne sait pas ou ne souhaite pas répondre, écrire NSP à droite du tableau, à la question correspondante.

PLAQUETTE N°2					Ordre
		Beaucoup	Plus ou moins	Pas du tout	
	Les inondations				
	Le bruit				
	Les centrales nucléaires				
	Le transport de matières dangereuses				
	Les déchets dangereux (chimiques, radioactifs)				
	La pollution atmosphérique				
	Les tempêtes				
	Les incendies (tous types)				
	La pollution des milieux aquatiques (cours d'eau, nappe phréatique, lacs...)				
	Les industries dangereuses				
	Les tremblements de terre				
	Les mouvements de terrain				
	La rupture d'un barrage				
	Les coulées de boues				

Pouvez-vous classer par ordre d'importance les 3 risques auxquels vous vous sentez le plus exposé(e) ?

Q9 – 1- Estimez-vous que l'on vous dit la vérité sur les risques auxquels vous êtes exposé(e), tout à fait, plus ou moins, ou pas du tout ?

Cochez la case correspondant à la réponse de l'enquêté(e)

2 - Pourquoi ?

-

Oui tout à fait	Plus ou moins	Non, pas du tout	Ne sais pas

Remarques : (noter ci-dessous toute remarque émise par l'enquêté(e), en précisant le n° de la question concernée)

-

Je vais maintenant vous interroger sur une catégorie particulière de risques, les risques majeurs collectifs, auxquels vous pourriez être exposé(e) sur votre lieu d'habitat/de travail. Un risque majeur collectif est un phénomène rare aux conséquences graves et qui affecte de nombreuses personnes.

Les questions suivantes portent sur les conséquences d'une éventuelle catastrophe.

Q10 – Si une catastrophe devait se produire dans l'agglomération mulhousienne, à laquelle pensez-vous ?
Une seule réponse ! noter la première citée.

.....

Q11 – Pourquoi pensez-vous à cette catastrophe en particulier ?

.....

Q12 – Si vous deviez préserver quelque chose, en cas de catastrophe, que préserveriez-vous en priorité ?
 Vous pouvez citer trois choix. *Noter l'ordre des priorités citées.*

.....

.....

.....

Q13 – Qu'est-ce qui serait le plus affecté par les conséquences d'une catastrophe entre les personnes (dont vous), les bâtiments et l'environnement ? *Il s'agit des conséquences de l'événement cité en question Q10.*

.....

Q14 – A quelle conséquences pensez-vous ?

Ne pas citer les réponses. Cocher la réponse.

- 1. Mort
- 2. Maladie
- 3. Lésions irréversibles
- 4. Destruction
- 5. Pollutions graves
- 6. Autres : préciser.....

Les questions suivantes concernent la gestion de la catastrophe si elle survient.

Q15 – Si une catastrophe se produisait, comment seriez-vous prévenu(e) ?

1- Dans le cas d'une catastrophe naturelle.....

ne sais pas

2- Dans le cas d'une catastrophe industrielle.....

ne sais pas

Q16– Comment pensez-vous que vous réagiriez ?

1- Dans le cas d'une catastrophe naturelle.....

ne sais pas

2- Dans le cas d'une catastrophe industrielle.....

ne sais pas

Q17 – Connaissez-vous les consignes à suivre si un accident industriel se produisait, très bien, plus ou moins bien ou pas du tout ?
Cocher la case correspondant à la réponse de l'enquêté(e)

Très bien	Plus ou moins bien	Non, pas du tout
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Si NON, aller à la question 19

Connaissez-vous les consignes à suivre si une catastrophe naturelle se produisait, très bien, plus ou moins bien, ou pas du tout ?
Cocher la case correspondant à la réponse de l'enquêté(e)

Très bien	Plus ou moins bien	Non, pas du tout
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Si NON, aller à la question 19

Q18 – Si oui, pouvez-vous citer la marche à suivre ?

1- Dans le cas d'une catastrophe naturelle

-
 -
 - ne sais pas

2- Dans le cas d'une catastrophe industrielle

-
 -
 - ne sais pas

Q19 - Vous estimez-vous suffisamment informé(e) sur les **consignes de sécurité** à suivre en cas de catastrophe ?

1. oui
 2. non
 3. ne sais pas

A présent, nous allons aborder les problèmes de prévention, c'est-à-dire les moyens mis en œuvre pour prévenir les risques et limiter les dangers.

Q20 – Quelles méthodes concrètes connaissez-vous pour la prévention des risques ?

Méthodes concrètes : moyens mis en œuvre par les autorités, les associations, les industriels, pour diminuer le risque.

-
 - ne sais pas
 - **Aller question 23**

Q21 – Si vous avez connaissance de méthodes particulières, d'où provient votre information sur ces méthodes ?

.....

Q22 – Quand cette information vous est-elle parvenue ?

Q23 – Avez-vous reçu un document concernant une ou des méthode(s) de prévention ?

1. oui 3 - Si oui, précisez lequel.....
 2. non (**Aller question 25**)

Q24 – Si vous avez reçu un document, l'avez-vous conservé ?

1. oui
 2. non

Q25 - Vous estimez-vous suffisamment informé(e) sur les **risques** en général ?

1. oui
 2. non
 3. ne sais pas

Q28bis – Quels moyens d'information privilégiez-vous/avez-vous l'habitude de consulter ?

Ne pas citer les réponses. Cocher la réponse.

1. Télévision
 2. Journaux nationaux
 3. Journaux locaux
 4. Radio
 5. Internet
 6. Autres :
 préciser.....

La perception des risques (Mulhouse)

7

Q28 - Comment souhaiteriez-vous être informé(e) sur les risques en général ?

.....

.....

Q26 - D'après vous, qui est censé vous informer des risques auxquels vous êtes exposé(e) ?

- - ne sais pas

- - ne sais pas

- - ne sais pas

Q27 - A qui faites-vous confiance pour vous informer des risques auxquels vous êtes exposé(e) ?

Vous pouvez cocher plusieurs réponses : 5 au maximum en notant l'ordre des citations

PLAQUETTE N°3	1. Les médias	
	2. Le maire	
	3. Les élus locaux	
	4. Le préfet ou les services de l'Etat	
	5. Les pompiers	
	6. La police / la gendarmerie	
	7. Les services de secours médicaux	
	8. Les scientifiques	

9. Les associations	
10. Les directions d'entreprises	
11. Les travailleurs de l'usine	
12. Les écologistes	
13. Les syndicats	
14. Autre : préciser	
15. Personne	
16. Ne sait pas	

Maintenant que nous avons abordé différents points sur les risques (gestion, information, prévention), je souhaiterais savoir ce qui serait important de prendre en compte, d'améliorer, d'après vous.

Q29 - A votre avis, pourrait-on améliorer votre sécurité face aux risques majeurs ?

1. oui 3 - Si oui, comment ?

2. non

Q31 - D'après vous, que faut-il améliorer pour diminuer les risques auxquels vous vous sentez exposé (e) ?

Vous pouvez cocher plusieurs réponses : 5 au maximum en notant l'ordre des citations

PLAQUETTE N°4	1. Les mesures de prévention	
	2. Un apprentissage à l'école	
	3. L'efficacité des moyens d'intervention	
	4. Les procédés industriels	
	5. L'information à la population	

6. La réglementation	
7. Aucune amélioration	
8. Autre : préciser.....	
.....	
9. Ne sait pas	

Les questions suivantes visent à savoir si vous avez déjà été touché(e) ou si vous avez eu connaissance d'un accident. Il s'agit d'une catastrophe naturelle ou d'un accident industriel.

Q32 - Avez-vous déjà été touché(e) par une catastrophe ?

1. oui 3 - Si oui, laquelle et quand ?

2. non

Q33 - Dans votre entourage, y a-t-il des personnes qui ont été touchées par une catastrophe ?

1. oui 3 - Si oui, de quelle manière ?

2. non

Q34 - 1. Avez-vous eu connaissance de catastrophes récentes dans la région ?

1. oui 3. si oui, lequel(s) ?

2. non

Remarques : (noter ci-dessous toute remarque émise par l'enquêté(e), en précisant le n° de la question concernée)

La perception des risques (Mulhouse)

8

FICHE SIGNALÉTIQUE

Je vous rappelle que cette enquête est anonyme mais nous avons besoin de quelques renseignements vous concernant.

Q35 - Age (exact)

1. 15-20		4. 41-50	
2. 21-30		5. 51-60	
3. 31-40		6. 61 et +	

Q36 - Sexe 1. F
 2. M

Q37 – Quelle est votre profession ou occupation ?.....

*Faire en sorte que la réponse soit la plus précise possible (par exemple, quel type d'employé ?)
S'il d'agit d'un(e) retraité(e), demander quelle était la profession antérieure, de même que pour les inactifs momentanés.*

Q38 - Quel est le dernier diplôme que vous avez obtenu ?

1. Aucun diplôme		5. Premier cycle*	
2. BEPC, certificat de fin d'études		6. deuxième cycle	
3. BEP, CAP		7. Troisième cycle	
4. Baccalauréat		8. Autre (à préciser)	

* BAC + 2 (DEUG, BTS, DUT)

Q39 –Quelle est votre religion ?

1. sans religion		4. musulman	
2. catholique		5. juif	
3. protestant		6 autre.	Préciser.....

Q40 – Dans quel type d'habitat logez-vous ?

Cocher la case correspondant aux réponses de l'enquête

1. Individuel	
2. Collectif	

Q41 – Etes-vous

1. Locataire	
2. Propriétaire	

Q42 - Quelle est votre situation familiale ?

1. en famille (jeunes)
 2. en couple
 3. célibataire

Q43 - Avez-vous des enfants ?

1. oui Si oui, sont-ils en bas âge ? 4. oui
 2. non 5. non

Remarques : (noter ci-dessous toute remarque émise par l'enquêté(e), en précisant le n° de la question concernée)

.....
.....

L'enquête est terminée, je vous remercie d'avoir bien voulu y répondre. Bonne fin de journée.

Annexe 13 : composition de l'échantillon de population enquê- tée

Composition de l'échantillon : groupes des habitants

Commune	Baldersheim	Brunstatt	Habsheim	Illzach	Kingersheim	Lutterbach	Morschwiller	Mulhouse	Pfastatt	Riedisheim	Rixheim	Sausheim	Wittenheim
%	0.4	2.2	2.2	6.1	5.7	2.6	0.9	56.3	2.6	6.1	6.1	1.7	7.0

Sexe	Féminin	Masculin
%	52.4	47.6

Age	15-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61 et +
%	9.6	27.1	14.8	10.9	16.6	21.0

PCS	Retraités	Etudiants et lycéens	Employés	Chômeurs et inactifs	Ouvriers	Professions intermédiaires	Cadres	Techniciens	Enseignants	Commerçants	Professions libérales	Artisans	Agriculteurs	Chefs d'entreprise
%	19.2	11.8	24.0	8.3	13.1	4.8	3.1	0.4	4.8	7.0	0.4	2.2	0.4	0.4

Situation familiale	En famille	En couple	Célibataire
%	15.7	45.0	39.3

Situation (enfants)	Sans enfants	Avec jeunes enfants	Avec enfants (> 6 ans)
%	48.5	15.3	36.2

Composition de l'échantillon : groupe des actifs

Commune	Baldersheim	Brunstatt	Habsheim	Illzach	Kingersheim	Lutterbach	Morschwiller	Mulhouse	Pfastatt	Riedisheim	Rixheim	Sausheim	Wittenheim
%	0.5	1.4	1.0	8.2	2.4	1.4	0.5	54.3	1.9	1.4	4.8	18.3	3.8

Sexe	Féminin	Masculin
%	50.5	49.5

Age	15-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61 et +
%	1.9	25.0	30.3	22.1	17.8	2.9

PCS	Retraités	Employés	Ouvriers	Professions intermédiaires	Cadres	Techniciens	Enseignants	Commerçants	Professions libérales	Ingénieurs	Artisans	Chefs d'entreprise
%	1.0	31.3	13.5	18.8	17.3	1.9	1.0	5.3	6,7	2.4	0.5	0.5

NAF	Industries extractives	Industries manufacturières	Production et distribution d'électricité, de gaz, d'eau	Construction	Commerce ; réparation automobile et d'articles domestiques	Hôtels et restaurants	Transports et communications	Activités financières	Immobilier, location et services aux entreprises	Administration publique	Education	Santé et action sociale	Services collectifs, sociaux et personnels
%	0.5	21.6	1.4	5.3	18.3	3.8	6.7	2.9	13.0	6.7	1.0	13.5	5.3

Situation familiale	En famille	En couple	Célibataire
%	16.8	60.6	22.6

Situation (enfants)	Sans enfants	Avec jeunes enfants	Avec enfants (> 6ans)
%	31.7	26.0	42.3

Composition de l'échantillon : groupe du public

Sexe	Féminin	Masculin
%	64.8	35.2

Age	15-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61 et +
%	35.2	24.1	3.7	5.6	7.4	24.1

PCS	Retraités	Etudiants et lycéens	Employés	Chômeurs et inactifs	Ouvriers	Professions intermédiaires	Cadres	Techniciens	Enseignants	Commerçants
%	14.8	55.6	3.7	7.4	5.6	1.9	1.9	3.7	1.9	3.7

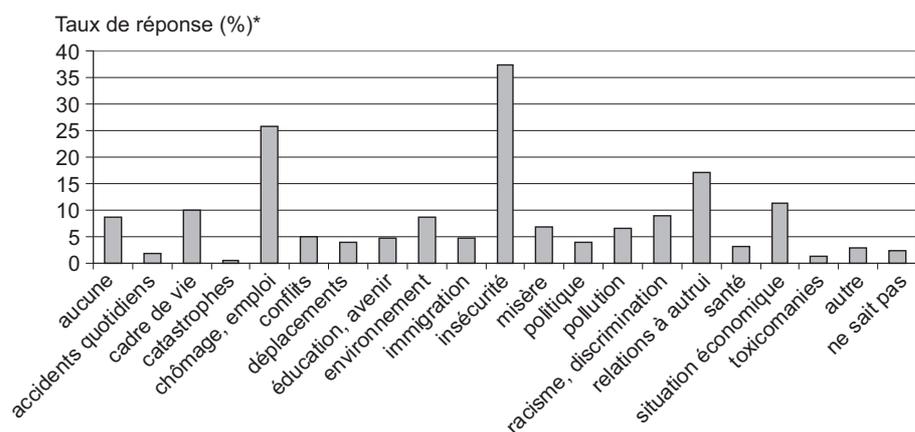
Situation (enfants)	Sans enfants	Avec jeunes enfants	Avec enfants
%	74.1	3.7	22.2

Sous-groupe	Lycéens	Etudiants	Formations diverses	Hospitalisés	Habitants foyers socio-médicaux	Personnes âgées
%	18.5	22.2	14.8	24.1	7.4	13.0

Situation familiale	En famille	En couple	Célibataire
%	40.7	16.7	42.6

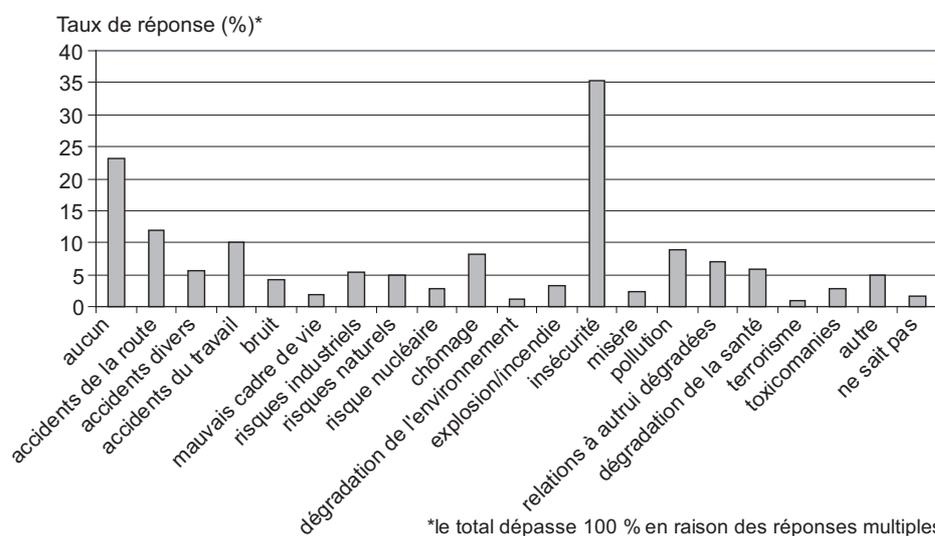
Annexe 14 : principaux résultats de l'enquête de représentation cognitive des risques par la population

Problèmes de société les plus préoccupants selon les personnes interrogées (échantillon total).



* le total dépasse 100 % en raison des réponses multiples

Risques auxquels les enquêtés se sentent exposés (échantillon total).



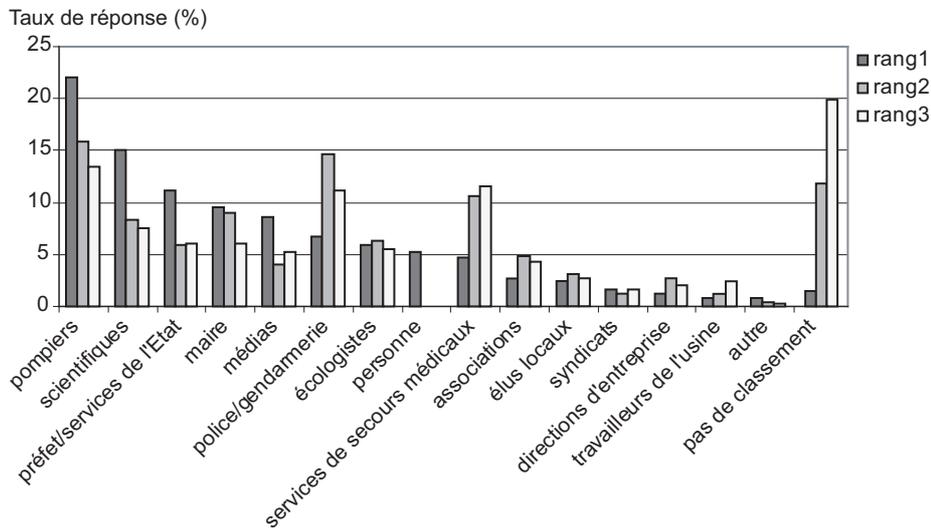
*le total dépasse 100 % en raison des réponses multiples

Catastrophes majeures redoutées par les enquêtés (échantillon total).

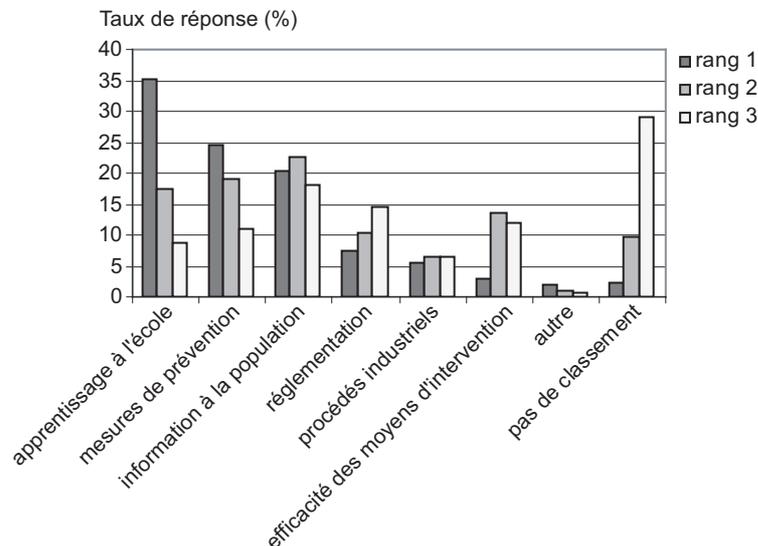
Catastrophe redoutée	Aucune	Attentat	Cat. nat. diverses	Crash d'avion	Explosion	Explosion de gaz	Incendie	Cat. indus.	Inondation	Cat. nucléaire	Pollution	Social (émeute...)	Tempête	TMD	Séisme	Autre	Ne sait pas
Taux de réponse (%)*	0.8	6.3	1.8	2.4	1.2	2.9	2.2	24.0	1.6	25.7	2.2	2.0	3.7	0.8	36.7	2.2	4.3

*Le total dépasse 100 % en raison des réponses multiples.

Acteurs à qui les enquêtés font le plus confiance pour les informer sur les risques (échantillon total).



Procédures à développer pour améliorer la sécurité face aux risques majeurs (échantillon total).



Sentiment d'être informé sur les risques ou les consignes par commune.

Commune		Réponses (en %)													
		Baldersheim	Brunstatt	Habsheim	Illzach	Kingersheim	Lutterbach	Morschwiller-le-Bas	Mulhouse	Pfastatt	Riedisheim	Rixheim	Sausheim	Wittenheim	Total
Suffisamment informés sur les risques en général	Oui	0.0	12.5	14.3	19.4	11.1	22.2	66.7	30.1	30.0	29.4	16.7	37.2	25.0	27.9
	Non	100.0	75.0	85.7	77.4	88.9	77.8	33.3	64.5	70.0	70.6	83.3	62.8	66.7	68.0
	Ne sait pas	0.0	12.5	0.0	3.2	0.0	0.0	0.0	5.4	0.0	0.0	0.0	0.0	8.3	4.1
Suffisamment informés sur les consignes	Oui	0.0	25.0	42.9	25.8	16.7	22.2	66.7	20.6	40.0	17.6	8.3	23.3	33.3	22.0
	Non	100.0	62.5	57.1	74.2	83.3	66.7	33.3	74.7	60.0	76.5	91.7	74.4	62.5	74.1
	Ne sait pas	0.0	12.5	0.0	0.0	0.0	11.1	0.0	4.7	0.0	5.9	0.0	2.3	4.2	3.9

Préoccupations des individus par tranche d'âge.

Préoccupations (%) / Age	15-20 ans	21-30 ans	31-40 ans	41-50 ans	51-60 ans	61 ans et +	Total
Aucune	11.1	8.7	12.1	5.4	5.1	10.4	8.8
Accidents quotidiens	6.7	0.8	2.0	1.4	1.3	1.5	1.8
Cadre de vie	11.1	7.9	11.1	10.8	12.7	7.5	10.0
Catastrophes	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.6
Chômage, emploi	15.6	26.8	34.3	25.7	27.8	16.4	25.9
Conflits	4.4	7.1	7.1	4.1	3.8	1.5	5.1
Déplacements	6.7	3.9	3.0	6.8	2.5	3.0	4.1
Education, avenir	2.2	3.9	6.1	2.7	7.6	4.5	4.7
Environnement	4.4	10.2	14.1	10.8	6.3	1.5	8.8
Immigration	0.0	2.4	1.0	8.1	6.3	11.9	4.7
Insécurité	40.0	33.1	41.4	33.8	34.2	44.8	37.3
Misère	2.2	9.4	9.1	4.1	7.6	4.5	6.9
Politique	6.7	6.3	1.0	4.1	2.5	3.0	3.9
Pollution	11.1	7.9	5.1	8.1	5.1	3.0	6.5
Racisme, discrimination	6.7	11.8	7.1	10.8	8.9	6.0	9.0
Relations à autrui	15.6	17.3	12.1	14.9	21.5	22.4	17.1
Santé	0.0	4.7	2.0	2.7	3.8	3.0	3.1
Situation économique	4.4	13.4	15.2	14.9	12.7	1.5	11.4
Toxicomanies	2.2	0.8	1.0	2.7	2.5	0.0	1.4
Autre	0.0	3.1	3.0	5.4	3.8	0.0	2.9
Ne sait pas	8.9	1.6	0.0	1.4	2.5	3.0	2.2

* Le total dépasse 100 % en raison des réponses multiples.

- rang 1
- rang 2
- rang 3

Connaissance des consignes à suivre en cas de catastrophe naturelle suivant la catégorie socio-professionnelle.

Connaissance des consignes (%)	PCS															
	Retraités	Etudiants et lycéens	Employés	Chômeurs et inactifs	Ouvriers	Professions intermédiaires	Cadres	Techniciens	Enseignants	Commerçants	Professions libérales	Ingénieurs	Artisans	Agriculteurs	Chefs d'entreprise	Total
Bonne réponse*	7.4	17.5	13.9	26.1	18.0	23.5	27.3	28.6	21.4	6.9	26.7	40.0	0.0	0.0	0.0	17.3
Réponse mixte*	0.0	5.3	8.2	0.0	9.8	13.7	13.6	0.0	7.1	10.3	0.0	0.0	16.7	0.0	0.0	7.5
Mauvaise réponse*	20.4	7.0	9.8	4.3	6.6	7.8	11.4	28.6	7.1	10.3	13.3	0.0	33.3	100.0	0.0	10.6
Ne sait pas*	72.2	70.2	68.0	69.6	65.6	54.9	47.7	42.9	64.3	72.4	60.0	60.0	50.0	0.0	100.0	64.6
Bonne réponse**	26.7	58.8	43.6	85.7	52.4	52.2	52.2	50.0	60.0	25.0	66.7	100.0	0.0	0.0	/	48.9
Réponse mixte**	0.0	17.6	25.6	0.0	28.6	30.4	26.1	0.0	20.0	37.5	0.0	0.0	33.3	0.0	/	21.3
Mauvaise réponse**	73.3	23.5	30.8	14.3	19.0	17.4	21.7	50.0	20.0	37.5	33.3	0.0	66.7	100.0	/	29.9

* Effectifs rapportés à l'ensemble des réponses données ("ne sait pas" compris)

** Effectifs rapportés uniquement aux consignes citées ("ne sait pas" exclu)

Préoccupations des enquêtés selon leur groupe d'appartenance (habitants, actifs, public).

Préoccupation (%) / Groupe	Habitants	Actifs	Public	Total
Aucune	7.4	10.1	9.3	8.8
Accidents quotidiens	2.6	1.0	1.9	1.8
Cadre de vie	16.2	4.8	3.7	10.0
Catastrophes	0.0	1.4	0.0	0.6
Chômage, emploi	14.8	37.0	29.6	25.9
Conflits	3.5	6.7	5.6	5.1
Déplacements	6.6	1.9	1.9	4.1
Education, avenir	3.1	6.3	5.6	4.7
Environnement	4.4	14.9	3.7	8.8
Immigration	8.3	1.4	1.9	4.7
Insécurité	45.4	30.3	29.6	37.3
Misère	4.8	9.1	7.4	6.9
Politique	0.9	6.7	5.6	3.9
Pollution	6.6	6.3	7.4	6.5
Racisme, discrimination	10.9	5.8	13.0	9.0
Relations à autrui	22.7	13.5	7.4	17.1
Santé	1.7	4.3	3.7	3.1
Situation économique	8.7	16.8	1.9	11.4
Toxicomanies	0.4	1.9	3.7	1.4
Autre	2.6	3.4	1.9	2.9
Ne sait pas	2.6	0.5	7.4	2.2

Le total des pourcentages dépasse 100 % en raison des réponses multiples.

RESUME

Le risque, sujet d'étude pluri-disciplinaire, fait l'objet de nombreux travaux. Pendant longtemps, il a été considéré sous l'angle du phénomène dangereux, l'aléa, et ce n'est qu'au milieu du XX^e siècle que des chercheurs et la société se sont davantage intéressés à la vulnérabilité des éléments exposés. Malgré la multiplicité des études sur les risques, peu d'entre elles adoptent une démarche multi-risques, la plupart étant mono-sectorielles. Pourtant, il est nécessaire de prendre en compte les risques dans une démarche globale si l'on souhaite s'approcher du monde réel, tant les possibilités d'effets dominos sont nombreuses.

Dans le cadre de cette thèse, nous soutenons l'hypothèse selon laquelle des interactions entre risques de nature différente peuvent être observées. Nous développons une approche intégrée (prenant en compte aléa et vulnérabilité des éléments exposés) multi-risques en milieu urbain, appliquée aux risques sismique et technologiques dans l'agglomération de Mulhouse (Haut-Rhin). La méthodologie s'articule en deux phases. Une première qui consiste à évaluer à l'échelle de l'agglomération les aléas, les vulnérabilités et les risques. Cela implique d'estimer les effets de site à l'échelle infra-communale et de caractériser l'aléa technologique en tenant compte d'un effet cumulatif des scénarios d'accidents. Il est également nécessaire d'évaluer la vulnérabilité physique et fonctionnelle des bâtiments d'une part, la vulnérabilité de la population d'autre part, selon deux approches (quantitative et qualitative). Une seconde phase consiste à simuler un séisme important ($M_W = 6.0$) afin d'identifier les interactions potentielles entre risques. L'ensemble des données est intégré dans un système d'information géographique, qui constitue un outil de représentation, de mise en relation et d'aide à la décision à destination des scientifiques et des autorités en charge de la prévention des risques par l'aménagement urbain et la gestion d'une crise.

Les résultats montrent 1/ la présence d'effets de site sur la totalité de la région étudiée ; 2/ des accélérations atteignant 0.25 g dans l'agglomération mulhousienne dans le cas d'un séisme $M_W = 6.0$ sur la faille d'Ilfurth, calculées à partir d'une loi d'atténuation standard ; 3/ un aléa technologique concernant la moitié de la surface de la région étudiée ; 4/ une faible représentation cognitive des risques par la population ; 5/ des interactions potentielles entre risque sismique et technologiques sur l'un des sites industriels sensibles (Rhodia-Dornach), mais dont les effets ne dépasseraient pas l'emprise du site ; 6/ de nombreuses interactions potentielles entre risques technologiques dans les deux secteurs étudiés (un total de 104 interactions issues des 31 scénarios).

Mots-clés : risque sismique, risque technologique, interactions, approche multi-risques intégrée, milieu urbain, Mulhouse, système d'information géographique, système d'aide à la décision.

ABSTRACT

Various disciplines have focused on risk for many years. For a long time, risk has been analysed mainly through its dangerous component, hazard. It is only in middle of the XXth century that researchers have taken an interest in the study of the vulnerability of exposed elements. Among the multiple studies of risks, only a few of them deal with a multi-risks approach, most of them being monosectoral. However, it is necessary to consider risks in a global approach, if we want to simulate real situations in which the chances of observing "dominos effects" are high.

In this research, we assume that interactions between risks of different nature can be observed. We develop a multi-risks and integrated approach to study the interactions between seismic and technological risks, considering both the hazard and the vulnerability of the exposed elements. This methodology is then applied to the urban area of Mulhouse (Haut-Rhin, France). The methodology follows two steps. The first step consists in evaluating hazards, vulnerability and risks at the scale of the urban area. This implies to evaluate site effects at a local scale, and to characterize technological hazard by taking into account the cumulative effects of different scenarios. Then, vulnerability is characterized by evaluating the physical and functional vulnerability of buildings, and the vulnerability of people using a quantitative and qualitative approaches. The objective of the second step is to simulate an important earthquake ($M_W = 6.0$) in order to identify the potential interactions between both risks. All the data are then integrated into a GIS, which tends to be a powerful tool for combining and representing the data, and can also constitute a decision support system for the authorities in charge of the prevention of risks through urban planning and crisis management.

The results show 1/ the presence of site effects all over the studied area; 2/ accelerations reaching 0.25 g in the urban area of Mulhouse, according to a $M_W = 6.0$ earthquake simulated on the Ilfurth fault and calculated with a standard attenuation law; 3/ technological hazard affecting half of the studied area; 4/ a low cognitive representation of risks by the population; 5/ potential interactions between seismic and technological risks on one of the two industrial sites (Rhodia-Dornach), however, the effects of the accidents would not go past the boundaries of the site; 6/ many potential interactions between technological risks on both sites (a total of 104 interactions identified from the 31 scenarios).

Keywords:

seismic risk, technological risk, interactions, integrated multi-risks approach, urban area, Mulhouse, geographic information system, decision support system.