

Identification des effets dominos suite à un séisme Application à l'agglomération de Mulhouse

Élise Beck*¹, Christiane Weber*, Michel Granet**

* Laboratoire Image et Ville, UMR 7011, CNRS/Université Louis Pasteur
3, rue de l'Argonne – 67000 Strasbourg, France.

Elise.Beck@bvra.ujf-grenoble.fr christiane.weber@lorraine.u-strasbg.fr

** Institut de Physique du Globe de Strasbourg, UMR 7516, CNRS/Université Louis Pasteur
5, rue René Descartes – 67084 Strasbourg, France.

Michel.Granet@eost.u-strasbg.fr

MOTS - CLÉS

Approche multirisque
Risque sismique
Risque industriel
Milieu urbain

RÉSUMÉ

Les risques en milieu urbain constituent une préoccupation grandissante, qui mérite de dépasser le stade de l'étude mono-sectorielle, ne prenant en compte qu'un seul risque à la fois. En effet, au vu des effets dominos observés ces dernières années, il est nécessaire d'étudier les risques selon une vision globale et d'identifier les éventuels effets dominos susceptibles de se produire. Dans le cadre de cette recherche, notre objectif a consisté à identifier les accidents industriels susceptibles de se produire suite à un tremblement de terre majeur. Fondée sur la détermination de la vulnérabilité physique aux séismes et sur la caractérisation de la fonction des bâtiments, cette méthode a été appliquée à l'agglomération de Mulhouse, exposée à sept aléas de nature différente. Les résultats obtenus indiquent que quatre accidents pourraient survenir suite à un séisme ; le scénario majorant correspond à une diffusion de substances toxiques dans un rayon de 130 m autour d'un des bâtiments d'un site industriel localisé dans l'ouest de Mulhouse. Ainsi, les effets n'atteindraient pas le secteur résidentiel qui avoisine le site industriel mais dépasseraient légèrement l'emprise du site au nord.

KEY WORDS

Multirisk approach
Seismic risk
Industrial risk
Urban environment

ABSTRACT

Identification of chain reactions following an earthquake. Application to the urban area of Mulhouse.

Urban risks are today of major concern, but most of the recent studies focus on one risk at the same time. However, considering the domino effects that have been observed recently, it is necessary to develop global studies of risks, in order to identify the potential chain reactions. In this study, we aim at identifying the industrial accidents that could be caused by a major earthquake. The methodology is based on the characterizing of the physical vulnerability of buildings and of their function; it has been applied to the urban area of Mulhouse, which is exposed to seven different hazards. The results show that four industrial accidents could occur following an earthquake; the worse scenario corresponds to the dispersion of hazardous materials within a 130-meter-radius-circle around the building. Thus, the effects of this accident would not reach the nearby residential district but would overhang the industrial site north of its limits.

¹ Élise Beck est actuellement rattachée à l'UMR 5194 PACTE-Territoires (UJF-UMPF-IEP-CNRS), 14 bis avenue Marie Reynoard 38100 Grenoble.

1. Introduction

Le risque, que l'on peut définir comme le résultat d'un croisement entre un aléa et une(des) vulnérabilité(s), constitue à l'heure actuelle une préoccupation grandissante, notamment en milieu urbain. Leur prise en compte dans l'aménagement urbain et leur gestion passent encore aujourd'hui par des approches mono-risque ou mono-sectorielles, concentrées sur un type de risque à la fois. Ceci ne reflète pourtant pas la réalité du risque, puisque des effets dominos suite à une catastrophe peuvent être observés : par exemple, les incendies ayant fait suite aux séismes de San Francisco (1906) ou de Kobé (1995), les dommages causés aux industries pétrochimiques turques par le tremblement de terre d'Izmit (1999), la centrale du Blayais mise à l'arrêt suite à la tempête de décembre 1999. Ces interactions entre risques, encore trop peu étudiées, représentées et prises en compte, méritent pourtant une attention particulière, dans un contexte d'urbanisation croissante. Ce constat est d'autant plus justifié que la plupart des grandes métropoles sont exposées à des aléas divers, entre lesquels des effets dominos sont à craindre.

Dans ce contexte, outre des études « classiques » du risque, qui intègrent aléa et vulnérabilité, il est légitime de développer des études multirisques, qui prennent en compte l'ensemble des risques auxquels un territoire est soumis, qui ne les considèrent pas comme des systèmes distincts et qui permettent d'identifier les potentiels effets dominos suite à un événement majeur. En effet, les études multirisques n'ont pas, à l'heure actuelle, mobilisé l'attention qu'elles méritent. Bien souvent, les travaux portent exclusivement sur les risques naturels (Mosquera Machado, 2002), même si certains s'intéressent aux interactions entre risques de nature différente (Barczak et Grivault, 2005). En fait, bien souvent, les auteurs procèdent à une analyse de plusieurs risques différents, mais indépendamment les uns des autres (Cutter *et al.*, 2000 ; Glade et van Elverfeldt, 2005, par exemple).

Dans la problématique des risques, le milieu urbain représente un système particulièrement complexe, d'une part en raison de la vulnérabilité prépondérante, liée aux densités d'hommes, de bâtiments, d'activités et de flux, mais également en raison de la diversité des aléas qu'il concentre : naturels, inhérents au contexte dans lequel les villes se sont implantées ; d'origine anthropique, nés de la révolution industrielle et de la dangerosité des activités humaines.

Cette étude a été appliquée à l'agglomération de Mulhouse, qui constitue une ville multirisque. Parmi les différents aléas auxquels elle est exposée, nous nous sommes focalisés sur les aléas sismique et industriel. Ainsi, l'objectif majeur de cette étude a consisté à identifier les accidents industriels susceptibles de se produire suite à un séisme majeur affectant

l'agglomération mulhousienne. Dans un premier temps, nous nous attacherons à décrire le contexte de l'agglomération de Mulhouse en termes de risques, puis nous détaillerons la méthodologie développée et présenterons les résultats obtenus. Enfin, une discussion mettra en lumière les limites de la méthode et ses conséquences en matière de prévention des risques par l'aménagement et la gestion de crise.

2. Contexte de l'étude : Mulhouse, agglomération multirisque

L'agglomération de Mulhouse (Haut-Rhin) constitue bien une zone multirisque, puisqu'elle est exposée à sept aléas de nature différente : séismes, inondations, coulées boueuses, accidents industriels, transport de matières dangereuses, rupture de barrage et accident nucléaire. L'agglomération, composée de 17 communes, comptait quasiment 200 000 habitants en 1999 (source : RGP INSEE). Elle concentre une activité économique importante, dans un contexte tri-national, à proximité des frontières suisses et allemandes. On peut notamment citer la présence de l'usine PSA Peugeot-Citroën de Sausheim, qui n'emploie pas moins de 14% de la population active de l'agglomération. Mulhouse constitue donc un site approprié à une étude multirisque. Dans ce contexte, nous nous sommes focalisés sur deux risques, sismique et industriel, car 1) ils concernent l'ensemble de la zone d'étude ; 2) leur faible probabilité d'occurrence peut constituer un frein à la construction d'une culture du risque. Concernant l'aléa sismique, la région de Mulhouse, localisée dans le sud du Fossé Rhénan (figure 1), a été marquée par un événement historique majeur, le séisme du 18 octobre 1356 ($I_0^1 = IX-X$), qui a causé des dégâts catastrophiques dans le contexte historique de l'époque : 80 châteaux forts construits dans un rayon de 40 km autour de la ville de Bâle ont subi des dommages plus ou moins importants. Il a été établi par Fähr et Deichmann (2001) que l'occurrence d'un tel séisme dans le contexte d'urbanisation actuel conduirait à des dégâts dont le coût est estimé entre 10 et 30 milliards d'euros. La sismicité récente, représentée par la sismicité instrumentale², est plus faible, mais elle est cependant marquée par plusieurs événements comme les séismes de Sierentz (30 juillet 1980, $M_L = 4.8^3$), Rambervillers (22 février 2003, $M_L = 5.4$), Roulans (23 février 2004, $M_L = 5.1$) ou Waldkirch (5 décembre 2004, $M_L = 5.3$).

¹ I_0 : intensité macrosismique, dont les valeurs s'échelonnent de I à XII et qui est déterminée en fonction des effets d'un séisme. I_0 est l'intensité à l'épicentre.

² Sismicité instrumentale : ensemble des séismes enregistrés par les réseaux de surveillance sismologiques, et qualifiés en termes de magnitudes, qui représente l'énergie dégagée au foyer. La sismicité historique correspond aux séismes du passé, dont il est fait mention dans les archives. Ces séismes sont décrits par une intensité macrosismique I_0 .

³ Source : Réseau National de Surveillance Sismique. M_L : magnitude locale d'un séisme.

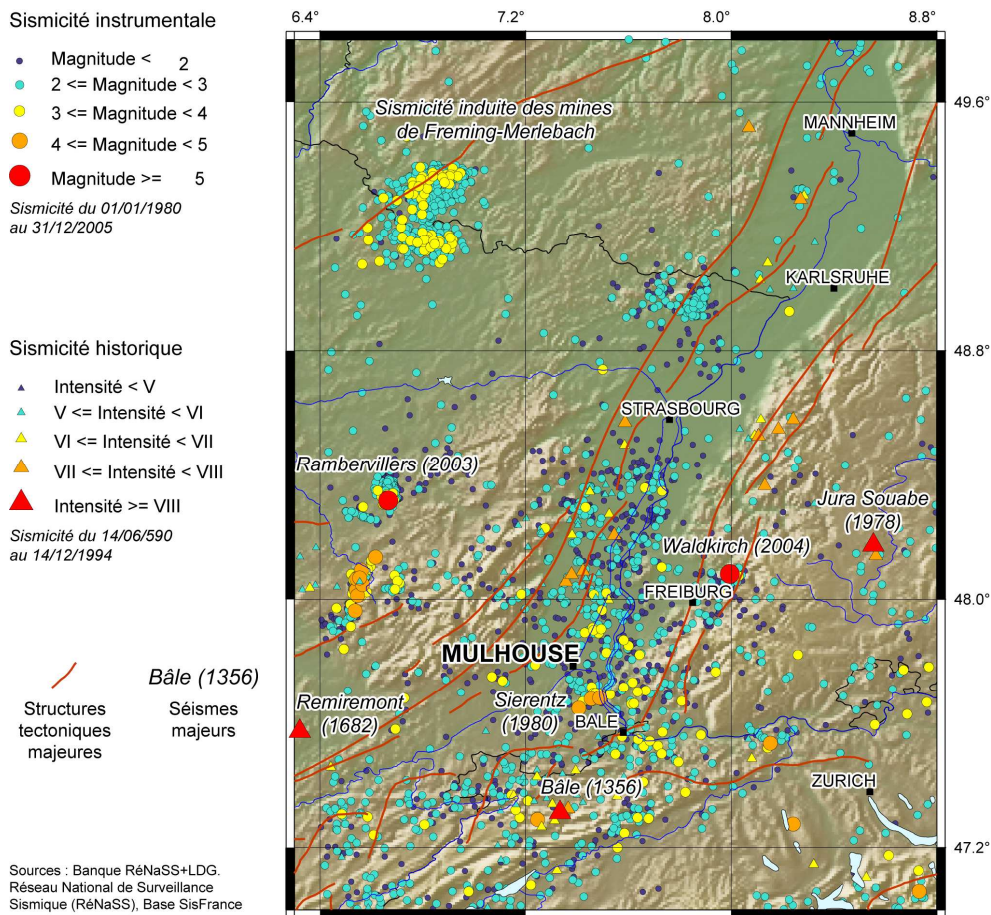


Figure 1. Sismicité historique et instrumentale du Fossé Rhénan.

Des dégâts mineurs ont été observés suite à ces séismes, des chutes de cheminée, des fissures plus ou moins importantes, etc. À la suite du séisme de Rambervillers, 47 communes ont fait l'objet d'un arrêté de catastrophe naturelle⁴. Le contexte tectonique du Fossé Rhénan et de ses bordures (Vosges, Jura, Forêt Noire) est donc à l'origine d'une sismicité faible à moyenne mais reste favorable à l'occurrence de mouvements forts. La figure 1 indique par ailleurs une asymétrie de la sismicité, beaucoup plus importante dans le sud du Fossé Rhénan, où est localisée la ville de Mulhouse. Ajoutons que l'essai de sismicité au nord-ouest de la carte est induit par l'exploitation minière.

En ce qui concerne l'aléa industriel, la région mulhousienne fait état de trois entreprises classées Seveso « seuil haut » : une industrie spécialisée dans la chimie organique, des entrepôts pétroliers et une entreprise de transport de matières dangereuses. Ces trois sites font l'objet de plans particuliers d'intervention (PPI). Un quatrième site bénéficie d'un tel plan mais ne constitue pas en soi un site classé : il s'agit de la gare de triage, qui fait l'objet d'un PPI en raison de la

quantité et de la dangerosité des substances qui y sont stockées ou qui y transitent. Le périmètre de ce plan illustre particulièrement bien le niveau d'aléa industriel, puisque, d'un rayon de 4 km autour du site de la gare, il englobe la quasi-totalité de la ville de Mulhouse et concerne au total quatorze communes de l'agglomération (figure 2). Les scénarios d'accident susceptibles de survenir sont de trois types différents : explosion, incendie et diffusion de substances toxiques.

Cette situation fait de Mulhouse un site particulièrement exposé aux risques, ce qui en fait une agglomération multirisque, où des effets dominos pourraient être observés suite à un événement majeur : accident industriel suite à un tremblement de terre, inondation suite à une rupture de barrage, accident de transport de matières dangereuses suite à une coulée boueuse... Ce cas de figure, parmi d'autres, amène à se poser un certain nombre de questions : si le tremblement de terre de Bâle de 1356 se reproduisait demain :

- quelles en seraient les conséquences ? sur la ville ? sur les industries dangereuses ?
- est-ce que des effets dominos pourraient se produire ?

⁴ Source : Journal Officiel du 27 juin 2003. Arrêté du 19 juin 2003 portant constatation de l'état de catastrophe naturelle et modifiant l'arrêté du 23 janvier 2002.

– est-ce que les plans d'urgence actuellement mis en place seraient à même de réagir à une crise qui dépasserait les frontières étatiques ?

La méthodologie présentée dans le cadre de cet article vise à répondre à la deuxième question, celle de l'identification des effets dominos.

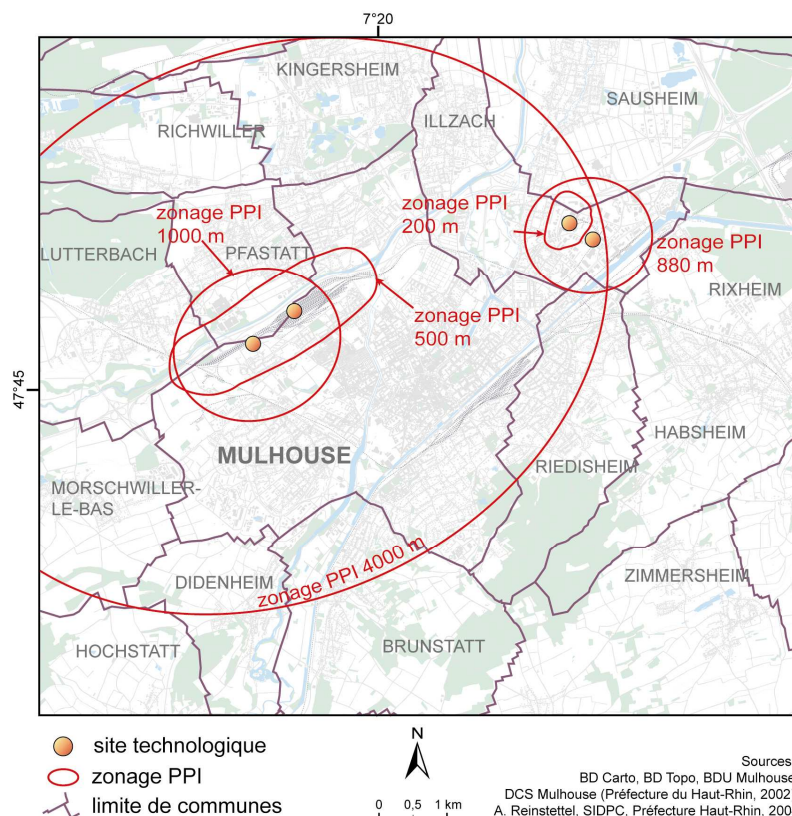


Figure 2. Aléa industriel de l'agglomération mulhousienne : entreprises classées Seveso, gare de triage et périmètres des PPI associés.

3. Méthodologie d'identification des effets dominos suite à un séisme et résultats observés

La méthode d'identification des effets dominos suite à un séisme repose sur un principe, celui qu'un séisme est susceptible de générer un accident industriel si un « bâtiment source » ne résiste pas aux secousses sismiques, parce qu'il est vulnérable d'un point de vue physique (figure 3). Un bâtiment source correspond à un bâtiment dans lequel se trouve un réservoir, une cuve, une conduite... contenant une/des substance(s) dangereuse(s) et qui sera le point de départ d'un accident. Étant donné que cette étude se situe à l'échelle de l'agglomération, la structure interne des bâtiments (résistance des cuves, conduites...) n'a pas été prise en compte, il s'agit d'une limite de cette étude.

La méthodologie mise en place nécessite deux étapes : la caractérisation de la vulnérabilité physique des bâtiments et l'identification de la fonction de ces bâtiments.

3.1. Caractérisation de la vulnérabilité physique des bâtiments

Évaluer la vulnérabilité d'un bâtiment est une tâche difficile lorsque l'on travaille à l'échelle d'une agglomération. En effet, la masse de données nécessaires est souvent un obstacle à une évaluation précise de cette vulnérabilité, et ce quel que soit le phénomène catastrophique envisagé (Leone *et al.*, 1996 ou Maquaire *et al.*, 2004, pour les mouvements de terrain ; Leone *et al.*, 2004, pour les tsunamis, etc.)

La vulnérabilité physique d'un bâtiment aux séismes peut être appréhendée par plusieurs méthodes. La plus répandue consiste à définir la vulnérabilité des bâtiments selon la typologie de l'échelle macrosismique européenne – EMS98 (Grunthal, 2001 ; AFPS, 2005), qui mesure sur une échelle graduée de I à XII la gravité d'un séisme en fonction des effets observés sur les êtres vivants, les objets, les bâtiments et les paysages. Pour comprendre les effets d'un séisme sur les bâtiments, connaître la résistance *a priori* de ces derniers est indispensable car des ondes sismiques d'amplitude et de fréquence données n'auront pas les mêmes effets sur

un bâtiment en maçonnerie et un immeuble construit en béton armé, d'où la mise en place d'une typologie de bâti. Six niveaux de vulnérabilité sont considérés, A à E ; A correspondant au plus vulnérable (structure en

moellon brut, pierre tout venant) et E au plus résistant (béton armé avec bon niveau de conception parasismique, par exemple).

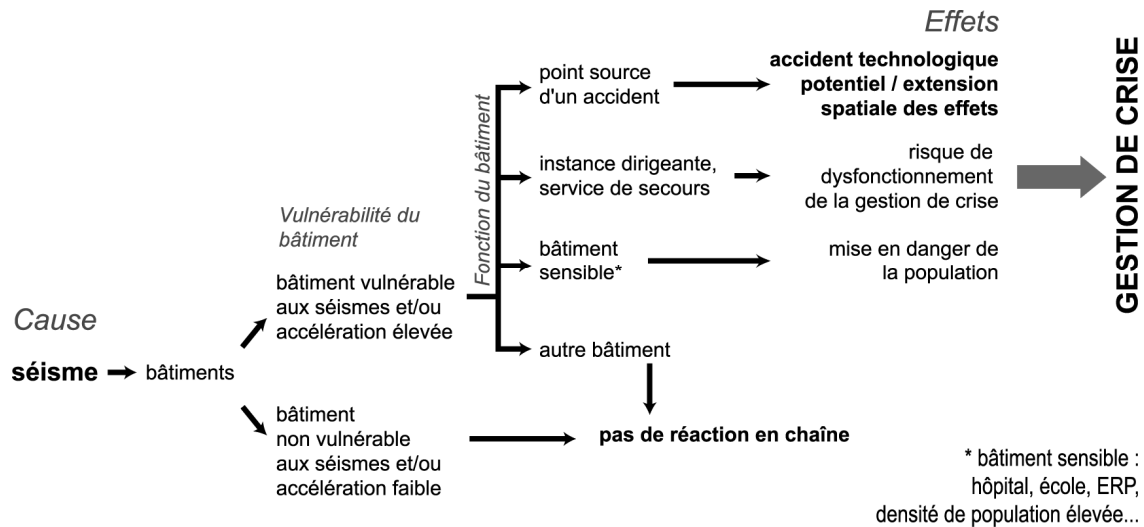


Figure 3. Méthodologie d'identification des effets dominos suite à un séisme.

Cependant, l'application de cette méthode requiert d'avoir accès à des données telles que le matériau de construction et/ou la structure interne du bâtiment (Marcot et Arnal, 2004). Ces données sont souvent peu accessibles à l'échelle d'une agglomération. Dans notre cas, n'ayant pas accès aux données permettant d'attribuer à chaque bâtiment sa classe de vulnérabilité d'après la typologie de l'EMS, nous avons entrepris de caractériser la vulnérabilité physique d'un bâtiment suivant son potentiel à entrer en résonance sous l'effet des ondes sismiques, c'est-à-dire son potentiel à résister à des accélérations du sol. Le potentiel d'entrée en résonance peut donc être défini comme un indice de vulnérabilité du bâtiment. Un bâtiment est caractérisé par une fréquence fondamentale de résonance foB , c'est-à-dire la fréquence des ondes sismiques à laquelle il va entrer en résonance. Cette fréquence dépend du type de matériau de construction du bâtiment, du nombre d'étages et de sa conception (avec ou sans contreventements, par exemple). Par ailleurs, le sol peut-être également qualifié en termes de fréquence fondamentale fo , qui dépend des paramètres géologiques et géotechniques du sous-sol. Il est établi que le potentiel d'entrer en résonance d'un bâtiment est maximal lorsque la fréquence fondamentale de résonance d'un bâtiment foB est égale à la fréquence fondamentale du site fo sur lequel il est construit (Betbeder-Matibet, 2003).

Une première étape a donc consisté à déterminer la fréquence fondamentale du site en un certain nombre de points de mesure définis suivant deux maillages : un premier maillage, où tous les sites de mesure étaient

espacés de 500 m dans la totalité de la région investiguée, et un second maillage, où les points de mesure étaient espacés de 100 à 200 m autour de bâtiments dits « sensibles » en raison de leur rôle par rapport à la gestion des risques : des bâtiments accueillant des services intervenant dans la gestion d'une crise (caserne de pompiers), des bâtiments d'usines Seveso (augmentant le risque) et des bâtiments d'une vulnérabilité élevée (hôpital). La méthode de Nakamura (Nakamura, 1989), dite également H/V, est reconnue comme performante pour estimer cette fréquence (par exemple, Field et Jacob, 1993 ; Fäh *et al.*, 1997 ; Le Brun *et al.*, 2001). Le rapport spectral obtenu en chaque site de mesure donne une estimation de sa fréquence fondamentale. Dans cet objectif, 565 mesures ponctuelles de bruit sismique ont été réalisées dans l'agglomération mulhousienne (Beck, 2006) ; 381 rapports spectraux se sont avérés exploitables, soit 67 % des mesures réalisées (figure 4). Une première analyse montre un gradient des valeurs de fréquences fondamentales du sud-est (valeurs comprises entre 4 et 8 Hz) vers le nord-ouest (valeurs comprises dans leur majorité entre 0,75 et 2 Hz). Ceci est notamment expliqué par les différences de contexte géologique, puisque le sud-est correspond à la partie septentrionale du horst de Mulhouse, recouvert de plaquages de loess, alors que le reste de la zone d'étude correspond à des alluvions vosgiennes et rhénanes.

Les valeurs de fréquence fondamentale obtenues ont par la suite été interpolées par krigeage et ramenées à chaque bâtiment.

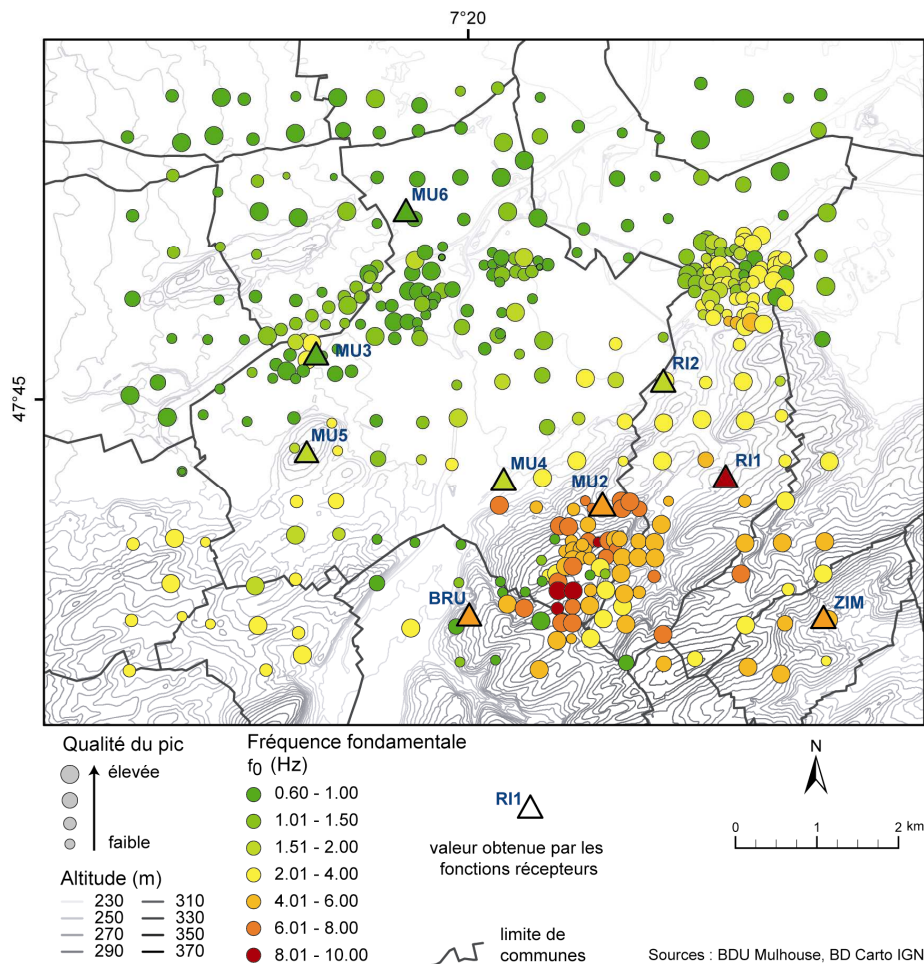


Figure 4. Fréquence fondamentale estimée en 381 sites de l'agglomération mulhousienne.

Plusieurs méthodes permettent de déterminer la fréquence fondamentale de résonance des bâtiments. L'une d'entre elle, également fondée sur le principe de Nakamura, consiste à procéder à des rapports spectraux à l'intérieur des bâtiments (Gallipoli *et al.*, 2004). Dans l'impossibilité de procéder à des mesures dans l'ensemble des 35 000 bâtiments de l'agglomération, nous n'avons pu mettre en œuvre cette méthode.

Les modèles simplifiés (AFNOR, 1995), qui consistent à calculer pour chaque bâtiment sa fréquence fondamentale de résonance à partir de paramètres décrivant les bâtiments (type d'ossature, hauteur, largeur, longueur, matériau de construction...), permettent de pallier ces difficultés matérielles. Ces méthodes nécessitent là encore d'avoir des connaissances précises sur les bâtiments, non disponibles en l'état actuel de nos recherches. Ainsi, nous avons eu recours à une formule empirique (équation 1), fondée sur la hauteur du bâtiment (Madariaga et Perrier, 1991).

$$f_{OB} = \frac{10}{n} \quad (1)$$

avec f_{OB} la fréquence fondamentale du bâtiment et n le nombre d'étages du bâtiment évalué à partir de sa hauteur.

Au final, la vulnérabilité physique d'un bâtiment est inversement proportionnelle à l'écart Δf_{OB} entre fréquence fondamentale de site et fréquence fondamentale de résonance du bâtiment. Une vulnérabilité élevée a été attribuée aux bâtiments de Δf_{OB} compris entre 0 et 1 Hz, moyenne pour les bâtiments de Δf_{OB} compris entre 1 et 2 Hz, et faible pour les bâtiments de Δf_{OB} supérieur à 2 Hz.

En matière de vulnérabilité physique aux séismes, 12 % des bâtiments pour lesquels la fréquence fondamentale a pu être calculée sont caractérisés par une vulnérabilité élevée aux séismes (figure 5). Parmi ces bâtiments plus vulnérables, 23 correspondent à des hôpitaux, cliniques..., quatre à des lieux de décision (sièges de collectivités...), trois à des bâtiments accueillant des services de secours et trois à des bâtiments sources d'accident industriel. On observe surtout une localisation préférentielle des bâtiments de vulnérabilité élevée dans le centre-ville, alors que les communes alentours comme Pfastatt, Morschwiller-le-Bas ou Richwiller semblent moins concernées. L'analyse des

scénarios correspondant à ces différents bâtiments est

décrite dans le paragraphe suivant.

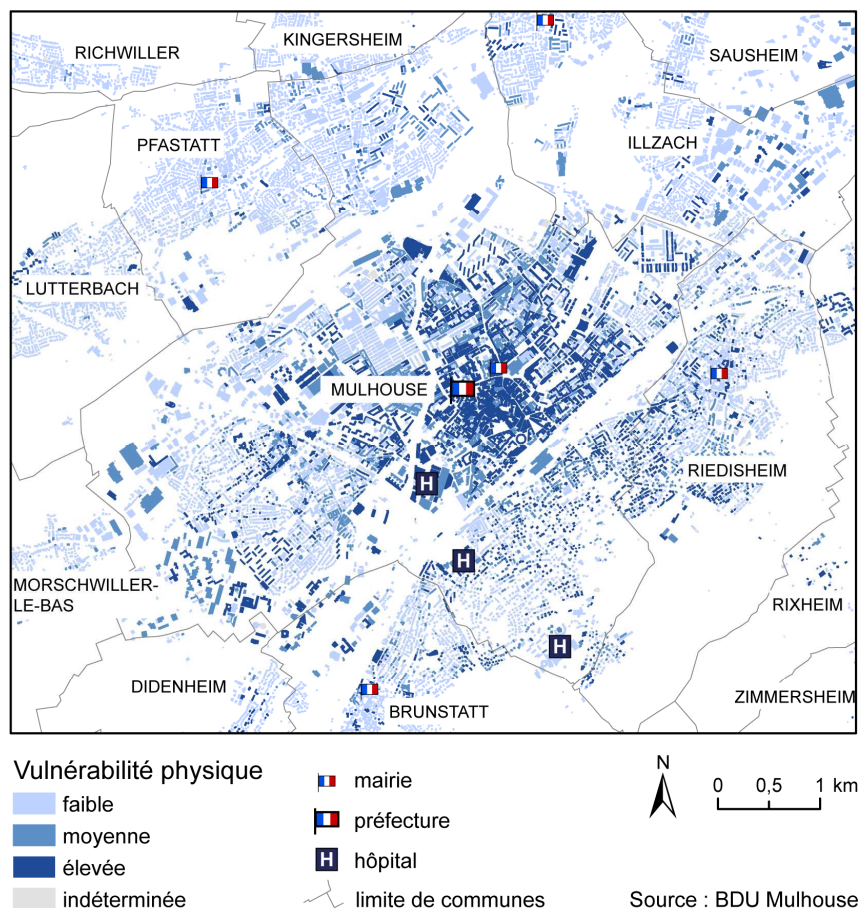


Figure 5. Vulnérabilité physique des bâtiments aux séismes.

3.2. Identification des bâtiments sources

Concernant l'identification de la fonction des bâtiments, nous nous sommes fondés sur la BD Topo®, la base de données spatiale de la ville de Mulhouse et des données fournies par des extraits d'études de danger afin d'identifier les secteurs les plus exposés et de localiser les bâtiments sources et les scénarios d'accidents associés. En effet, les extraits d'étude de dangers permettent d'identifier quels sont les bâtiments considérés comme des bâtiments sources (parce que des substances dangereuses y sont entreposées, manipulées ou produites), la nature des accidents susceptibles de s'y produire (incendie, explosion, diffusion de substances toxiques), et l'étendue spatiale⁵ des effets indésirables (zone de létalité).

Dans le cas de l'agglomération de Mulhouse, neuf bâtiments correspondent à des bâtiments sources, où 31 scénarios d'accidents sont envisagés. Il s'agit autant de scénarios d'incendie que d'explosion et de diffusion de substances toxiques. Les enveloppes de ces scénarios

⁵ L'étendue spatiale des effets a été nommée « enveloppe ». Elle est caractérisée par un pseudo-rayon, en mètres, autour de la source de l'accident, qui n'est pas nécessairement ponctuelle : l'enveloppe n'est donc pas obligatoirement un cercle.

sont caractérisées par des rayons variant entre 1 et 4 000 m (ce dernier scénario correspond à un accident impliquant un wagon de chlore sur le site de la gare de triage. Il est considéré comme le scénario majorant du site de la gare de triage et définit la taille du périmètre du PPI).

3.3. Identification des effets dominos

La méthodologie repose sur le principe qu'une réaction en chaîne peut se produire si un bâtiment source est vulnérable aux séismes. Ainsi, il faut dès lors identifier les bâtiments répondant aux deux critères – bâtiment vulnérable aux séismes et bâtiment source – pour déterminer si des accidents industriels pourraient se produire suite à un séisme. L'intégration de l'ensemble des données collectées et acquises au cours des différents traitements, suivie par le croisement des deux critères dans un SIG, a permis de mettre en exergue les scénarios d'effets dominos susceptibles de se produire suite à un tremblement de terre important.

La figure 6 présente les résultats observés sur l'un des sites industriels (industrie spécialisée dans la chimie organique, localisé dans l'ouest de Mulhouse ; figure 2). Sur ce site, trois bâtiments répondent aux deux critères

« bâtiment vulnérable aux séismes » (représentés par des polygones bleus foncés sur la figure 6) et « bâtiment source » (les polygones ont un contour rouge). Parmi ces trois bâtiments, l'un d'entre eux, situé au sud, est susceptible d'avoir été construit aux normes parasismiques, alors que les deux autres bâtiments sont beaucoup plus anciens. Le bâtiment conçu pour résister aux séismes est donc écarté de notre étude, car l'on peut espérer qu'il résiste aux secousses, bien que la méthode mise en place l'ait identifié comme vulnérable vis-à-vis de son potentiel à entrer en résonance. D'après les extraits des études de dangers, les scénarios associés aux deux autres bâtiments consistent respectivement en

trois scénarios de diffusion de substances toxiques dans un rayon de 69, 97 et 129 m autour de l'un d'eux et en une explosion avec des effets létaux dans un rayon de 31 m pour le second. Le scénario majorant correspond donc à une dispersion de produits dangereux (dans ce cas précis, de l'ammoniac) dans un rayon de 129 m autour du bâtiment (l'enveloppe de ce scénario est représentée par un cercle orange sur la figure 6). Cet accident aurait des effets qui ne dépasseraient pas l'emprise du site industriel au sud (les limites du site industriel sont représentées en marron sur la figure 6), dans sa partie résidentielle, mais atteindraient par contre le site de la gare de triage, au nord.

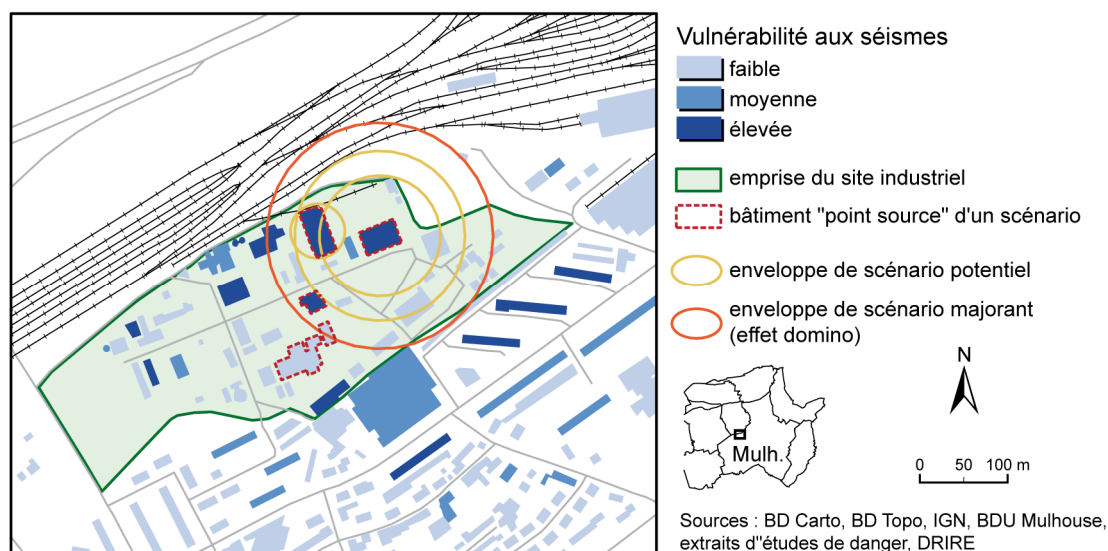


Figure 6. Application de la méthode sur l'un des sites industriels. Par souci de lisibilité, seules les enveloppes des scénarios potentiels des deux bâtiments vulnérables ont été indiquées sur cette carte.

4. Discussion

La méthodologie proposée dans le cadre de cet article a permis d'identifier quatre scénarios d'effets dominos suite à un séisme, si les bâtiments concernés venaient à entrer en résonance. Cependant, cette méthodologie ne prend pas en compte les accélérations des ondes subies par les bâtiments. La modélisation d'un séisme et plus précisément l'estimation de l'accélération attendue constitue l'étape suivante dans l'étude des effets dominos suite à un tremblement de terre.

Notre démarche repose également sur une estimation approchée de la fréquence fondamentale de bâtiment. Il convient donc de confirmer les résultats observés par une étude approfondie de la fréquence de résonance des bâtiments, notamment des bâtiments les plus sensibles comme les bâtiments sources d'accidents industriels. Une perspective de travail consiste à appliquer cette méthode en se fondant sur des données dotées d'une incertitude plus faible et d'étudier les éventuelles différences entre les résultats obtenus par les deux méthodes, notamment les résultats issus des travaux du

BRGM sur les scénarios sismiques en milieu urbain (Marcot et Arnal, 2004 ; Mouroux *et al.*, 2004).

Malgré ces incertitudes, les résultats offrent de nombreuses perspectives de recherche et la finalité même de la méthode a des conséquences sur la prévention des risques par l'aménagement du territoire et la gestion de crise.

Au-delà de l'identification des effets dominos se pose la question des secteurs exposés à deux aléas différents. Par exemple, dans le cadre du plan local d'urbanisme, des zonages spécifiques – et les prescriptions correspondantes – pourraient être définis. Les zonages intégreraient le fait que des secteurs soient exposés à plusieurs risques. Un zonage semblable existe déjà dans le cadre du POS de Mulhouse (zonage UX1) mais il ne concerne que les secteurs avoisinant une installation classée Seveso « seuil haut » (un seul risque). Des restrictions en termes d'aménagement pourraient être prévues, notamment concernant la fonction des bâtiments (interdire la construction d'un centre de secours, d'une maison de retraite...) ou la capacité

d'accueil de ceux-ci, dans l'objectif de limiter leur vulnérabilité.

En ce qui concerne la gestion de crise, il est important pour les autorités et l'ensemble des acteurs intervenant au moment d'une crise d'identifier les réactions potentielles car les interventions des secours sont différentes selon la nature de la catastrophe : en d'autres termes, on ne réagit pas de la même manière face à un séisme et face à un accident toxique. Il est donc important d'identifier préalablement les effets dominos potentiels afin de pouvoir mobiliser les services de secours sur tous les fronts le moment venu. Cette réaction simultanée à deux catastrophes différentes peut notamment être préparée par l'intermédiaire d'exercices grandeur nature, qui intégreraient les effets dominos potentiels.

5. Conclusion

La démarche d'identification des effets dominos proposée dans cet article repose sur : 1) la détermination de la vulnérabilité physique des bâtiments aux séismes. Cette première étape repose sur l'estimation de la fréquence de résonance du site et du bâtiment, respectivement à partir de la méthode de Nakamura et d'une formule empirique ; 2) l'identification de la fonction des bâtiments au sein desquels peuvent survenir des accidents industriels.

La méthode a permis d'identifier des effets dominos potentiels sur l'un des quatre sites classés Seveso « seuil haut », dans l'agglomération mulhousienne. Ces conclusions doivent être cependant confortées par des investigations géotechniques approfondies dans l'objectif d'une caractérisation plus fine de la vulnérabilité physique des bâtiments aux séismes. Dans un contexte plus large, ces travaux ouvrent des perspectives intéressantes dans l'intégration de potentiels risques supplémentaires dans l'évaluation des effets dominos (transport de matières dangereuses, inondations...), notamment au vu des implications de ces recherches en termes de prévention des risques. Ils soulignent également la difficulté à modéliser les risques chimiques, thermiques ou de surpression, notamment en l'absence de données précises sur les installations dangereuses.

Remerciements

Cette étude a bénéficié du financement de l'Union Européenne et du Conseil Régional d'Alsace dans le cadre du programme européen Interreg n°3C8 « microzonage sismique dans la Région sud du Rhin supérieur » (2002-2006) ; responsable scientifique : Michel Granet (IPGS).

6. Références bibliographiques

- Association Française du Génie Parasismique (AFPS), 2005, *Vulnérabilité sismique du bâti existant : approche d'ensemble*, Cahier Technique de l'Association Française du Génie Parasismique 25, Paris
- Association Française de Normalisation (AFNOR), 1995, *Règles de construction parasismique. Règles PS applicables aux bâtiments, dites Règles PS 92*. NF P 06-013.
- Barczak A., Grivault C., 2005, Risques urbains en interactions : une méthode d'évaluation. L'exemple de Longvic, une commune du sud-est dijonnais, in Josselin D. et Libourel T. (éd.), *Actes du colloque SAGEO*, Avignon, 20-23 juin 2005.
- Beck E., 2006, Approche multi-risques en milieu urbain. Le cas des risques sismique et technologiques dans l'agglomération de Mulhouse (Haut-Rhin), Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg.
- Betbeder-Matibet J., 2003, *Génie parasismique*, Hermès Sciences Publications, Paris.
- Cutter S. L., Mitchell J. T., Scott M. S., 2000, Social vulnerability to environmental hazards, *Social Science Quarterly*, 84 (2), 713-727.
- Bureau Central Sismologique Français, 2003, Séisme de Rambervillers (départ. 88) du 22 février 2003, observations macrosismiques, note préliminaire.
- Fäh D., Deichmann N., 2001, 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*.
- Fäh D., Ruettener E., Noack Th., Kruspan P., 1997, Microzonation of the city of Basel, *Journal of Seismology*, 1, 87-102.
- Field E. H., Jacob K., 1993, The theoretical response of sedimentary layers to ambient seismic noise, *Geophysical Research Letters*, 20 (24), 2925-2928.
- Gallipoli M. R., Mucciarelli M., Castro R. R., Monachesi G., Contri P., 2004, 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, 487-295.
- Glade T., van Elverfeldt K., 2005, An innovative conceptual approach to model natural risks, *European Geosciences Union General Assembly*, Vienne, Autriche, 24-29 avril 2005.
- Grunthal (dir.), 2001, L'Echelle Macrosismique Européenne – European Macroseismic Scale 1998, *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, 19, Ministère de la Culture, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche du Luxembourg, Conseil de l'Europe.
- Le Brun B., Hartzfeld D., Bard P.-Y., 2001, Site effects study in urban area: experimental results in Grenoble (France), *Pure Applied Geophysics*, 128, 2543-2557.

- Leone F., Aste J.-P., Leroi E., 1996, Vulnerability assessment of elements exposed to mass-movement: working toward a better risk perception, *Actes du colloque international sur les mouvements de terrain, Trondheim*, Norvège, juin 1996, *Landslides*, Sennes Editions, Balkema, Rotterdam, 263-269.
- Leone F., Denain J.-C., Vinet F., Bachri S., 2004, Analyse spatiale des dommages au bâti de Banda Aceh (Sumatra, Indonésie) : contribution à la connaissance du phénomène et à l'élaboration de scénarios de risque tsunami, in : Lavigne F., Paris R. (coord.), *Le tsunami du 26 décembre 2004 en Indonésie, Rapport scientifique du programme TSUNARISQUE (2005-2006)*, 69-94.
- Madariaga R., Perrier G., 1991, *Les tremblements de terre*, Presses du CNRS, Paris.
- Maquaire O., Thiery Y., Malet J.-P., Weber C., Puissant A., Wania A., 2004, Current practices and assessment tools of landslide vulnerability in mountainous basins. Identification of exposed elements with a semi-automatic procedure, in: Fountorera S. A. B., Sayão A. S. F., Lacerda W. A., Ehrlich M. (eds.), *Landslides evaluation and stabilization*, 1, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- Marcot N., Arnal, C., 2004, Méthodologie de réalisation d'un scénario de séisme sur la ville de Mulhouse (68), Rapport technique, rapport BRGM/RP-52760-FR.
- Mouroux P., Le Brun B., Depinois S., Bertrand E., Masure P., 2004, Projet européen RISK-UE : application à la ville de Nice. Rapport BRGM/RP-53202.
- Mosquera Machado S., 2002, Analyse multi-aléas et risques naturels dans le département du Chocó (nord-ouest de la Colombie), Thèse de doctorat, Université de Genève.
- Nakamura Y., 1989, 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.