

LE RISQUE SISMIQUE ET SA PREVENTION EN REGION WALLONNE

PLUMIER André (1), CAMELBEECK Thierry (2), BARSZEZ Anne-Marie (3)

(1) Mécanique des structures et des matériaux, Université de Liège.

a.plumier@ulg.ac.be

(2) Section de Sismologie, Observatoire Royal de Belgique.

thierry.camelbeeck@oma.be

(3) Service d'Architecture, Faculté Polytechnique de Mons

amb_004@yahoo.fr

1. Introduction

Les régions du nord-ouest de l'Europe qui s'étendent de la vallée du Rhin au sud de la Mer du nord sont caractérisées par une activité sismique faible par comparaison à celle observée dans le monde. Pourtant, presque chaque année, des tremblements de terre sont ressentis par la population et régulièrement, certains d'entre eux provoquent localement des dégâts qui peuvent être significatifs. Ce fut le cas dans la région liégeoise le 8 novembre 1983 et dans la région de Roermond aux Pays-Bas le 13 avril 1992. Les dégâts provoqués par ces deux événements (75 millions d'euros à Liège en 1983 pour un séisme de magnitude 4,7) ont montré la vulnérabilité de nos villes vis-à-vis de l'action sismique, mais les recherches historiques nous apprennent aussi que des tremblements de terre bien plus importants, de magnitude pouvant atteindre 6,5, se sont produits dans le passé. La sismologie nous enseigne qu'ils se reproduiront. De tels événements auront des conséquences sérieuses, en termes de vies humaines et en termes économiques : coût de réparations ou reconstructions, manque à gagner durant la période de crise dans les entreprises victimes de dégâts ou de destructions d'unités de travail.

Les risques liés aux tremblements de terre sont généralement sous estimés ou ignorés en Belgique. Mais des études de risque effectuées par des compagnies d'assurance montrent que ce risque est, pour un bâtiment donné, le même que celui d'un incendie. La différence de perception des deux risques est le résultat d'une différence entre ces deux actions néfastes : des incendies surviennent régulièrement, mois après mois, et de façon dispersée sur tout le territoire ; un séisme affecte en une seule fois beaucoup de constructions dans une région donnée. Mais globalement le risque par construction est le même. Il n'y a donc pas de raison de se préoccuper de l'incendie (ou de l'inondation ou de la tempête de vent) et de ne pas prendre en considération les séismes. Dans cet article, nous apportons des éléments d'information sur l'action sismique en Belgique, sur ses effets estimés et sur les diverses formes de prévention possibles dans le domaine de la construction.

Pour la clarté de ce qui suit, il convient de donner ici la définition de 4 notions fondamentales :

L'**alea sismique** d'une région ou d'un site donné définit les caractéristiques des mouvements sismiques susceptibles de s'y produire dans le futur en tenant compte de la durée de vie des constructions concernées et des types d'activité qui y sont réalisées.

La **vulnérabilité** d'une construction définit la sensibilité d'une construction à l'action sismique; on la caractérise par un indice lié à la géométrie (dimensions, hauteur, forme

en plan, caractéristiques architecturales) et aux matériaux de la construction. Cette notion de vulnérabilité inclut l'importance des bâtiments en terme de 'coût', mais aussi en terme de 'valeur immatérielle' et de 'vies humaines menacées'.

Le **risque sismique** lié à l'impact sur les constructions définit l'importance et le coût des dégâts que peut faire un séisme d'un niveau donné dans une construction donnée. Ce « **risque sismique** » est d'autant plus grand que l'**alea sismique** et la **vulnérabilité** sont grands et on a :

$$\text{Risque sismique} = \text{alea sismique} \times \text{vulnérabilité}$$

De manière plus générale, on parle des risques sismiques, parce que lors d'un tremblement de terre, les conséquences ne se calculent pas uniquement en terme de dégâts aux constructions. Les enjeux concernent également l'impact en terme de vies humaines et du nombre de personnes blessées, du coût économique lié à la perturbation ou l'arrêt de l'activité de certaines entreprises, du coût social résultant des populations ayant perdu leur logement,...

La **prévention** concerne les actions à mener, connaissant les risques sismiques, de manière à diminuer l'impact des tremblements de terre futurs. Diminuer le risque ne peut se faire qu'en diminuant la vulnérabilité, parce que l'aléa découle des contraintes de notre environnement naturel et ne peut être modifié. Le scientifique essaie de l'évaluer au mieux. Le rôle de l'ingénieur est de fournir des procédés de construction ou de réhabilitation qui permettent de réduire la vulnérabilité des nouvelles constructions ainsi que du bâti existant.

2. L'activité sismique dans nos régions – quelques séismes destructeurs – la surveillance sismique en Belgique

L'activité sismique en Belgique et dans les régions voisines est considérée comme modérée par les spécialistes. Presque chaque année, des secousses sont suffisamment fortes que pour être ressenties par la population et régulièrement, des tremblements de terre sont destructeurs.

Lors du séisme à Liège [1] en 1983, plus de 16000 maisons ont été fortement affectées dans un rayon de 3 km autour de l'épicentre et il a été nécessaire de reloger plus de 700 familles. L'importance des dégâts constatés à cette occasion pour un séisme de magnitude aussi faible ($M_s = 4.7$) est le reflet de la faible profondeur du foyer dans une région fortement peuplée, ainsi que de la vulnérabilité des constructions en briques typiques des anciennes régions industrielles de l'Europe du nord-ouest. Le dégât le plus visible a été la chute d'innombrables cheminées. D'autres parties de constructions tels des frontons en pierre de taille ou des couvertures de cheminées sont également tombées. La chute de tous ces objets a causé des dégâts nombreux aux toitures et aux véhicules stationnés au pied des immeubles (figure 1). Cela aurait pu être la cause de nombreux décès si le tremblement de terre s'était produit pendant la journée. Un autre type de dégâts largement observé a été le mouvement des façades perpendiculairement à leur plan, entraînant une fissuration de l'angle entre façade et mur de refend. Dans les deux communes les plus touchées, Saint-Nicolas et Liège, 129 immeubles ont été déclarés inhabitables et 37 maisons ont dû être démolies.

Il faut néanmoins souligner que même dans la zone épiscopale, les constructions saines et simples en brique et les constructions conçues voire calculées pour résister à des forces horizontales n'ont pas été particulièrement affectées.

On a constaté également dans les mois d'hiver qui ont suivi le séisme un nombre significativement plus élevé que d'habitude du nombre d'intoxication par le monoxyde de carbone. Elles ont été vraisemblablement provoquées par des fissurations dans les cheminées conséquentes au tremblement de terre.

Durant le 20^{ème} siècle, d'autres tremblements de terre ont provoqué des dégâts à une échelle locale et celui de Liège n'est pas celui dont l'impact en Belgique a été le plus important. Le 11 juin 1938, un autre tremblement de terre a ainsi affecté fortement tout le territoire belge ainsi que le nord de la France [2]. Son épiscentre était localisé dans la région des collines entre les villes de Renaix et Audenaerde et sa magnitude a été évaluée à $M_S = 5.0$ à partir de l'analyse des enregistrements sismiques dans les stations européennes [3]. Ce séisme a provoqué des dégâts sur une très grande étendue du territoire (figure 2), couvrant les provinces de Flandre Occidentale, Flandre Orientale, Hainaut, Brabant Wallon, Brabant Flamand et la région Bruxelloise. Le nombre connu de cheminées endommagées s'élève à 17550, trois personnes ont été tuées et quelques dizaines de personnes ont été blessées. La figure 2 indique l'intensité des mouvements du sol, réévaluée dans l'échelle européenne EMS-98 [4] dans les communes belges pour lesquelles les informations collectées à l'Observatoire Royal de Belgique (ORB) permettaient de la déterminer.

L'intensité VII (en bleu sur la figure 2) a été observée dans un certain nombre de localités, et jusqu'à des distances approchant 100 km de l'épiscentre. Cette intensité correspond à des dégâts sensibles à importants dans des maisons de qualité moyenne, tels une fissuration importante dans les murs, des tuiles se détachant du toit, des cheminées fracturées à la jonction avec le toit ainsi que la défaillance d'éléments tels cloisons et murs pignons.

L'intensité VI (en rouge sur la carte) a été observée sur une surface elliptique allongée dans une direction nord-ouest sud-est et de grand et petit axes ayant des longueurs respectives de 200 et 100 km. Ce degré d'intensité correspond à des mouvements du sol ressentis par de nombreuses personnes à l'extérieur des habitations. Quelques personnes y perdent l'équilibre. De nombreuses personnes sont effrayées à l'intérieur des habitations et se précipitent à l'extérieur croyant que celle-ci va s'effondrer. Des dégâts légers (fissures capillaires dans des murs, chute de petits débris de plâtre) apparaissent dans de nombreuses constructions, tandis que quelques unes peuvent déjà subir des dégâts modérés (fissures dans les murs, chute de grands morceaux de plâtre, effondrement partiel de cheminées).

Dans les régions citées, de nombreux témoins ont également vu osciller les bâtiments, les arbres, les clôtures, les poteaux électriques, les blés dans les champs ; des agriculteurs ont senti le sol se dérober sous leur pied. A Mons, des cyclistes ont perdu l'équilibre et un tramway a déraillé.

Le tremblement de terre a eu des effets sur les eaux de surface. Les remous de l'Escaut à Merelbeke ont fortement agité les bateaux tandis les eaux se sont soulevées jusqu'à un mètre de hauteur sur les bords de la Lys à Lauwe. Les effets sur les eaux souterraines ont également été très impressionnants avec des variations importantes des débits observés et le tarissement de certaines sources.

Ces descriptions montrent bien que les risques liés aux tremblements de terre dans nos régions ne sont pas limités à des dégâts aux constructions, mais qu'il est nécessaire également de prendre en compte les conséquences environnementales possibles.

En remontant dans le temps, par la recherche des documents du passé et leur critique par des historiens, on a retrouvé les traces de tremblements de terre beaucoup plus importants que les tremblements de terre modérés, localement destructeurs, mentionnés ci-dessus. Des études récentes montrent que, depuis le 14^{ème} siècle, au moins trois tremblements de terre ont dépassé la magnitude 6.0 dans la région qui s'étend de la vallée du Rhin au sud de la Mer du Nord. Ce sont les séismes du 21 mai 1382 dans le sud de la mer du Nord, du 6 avril 1580 dans le Pas de Calais et du 18 septembre 1692 dans le nord de l'Ardenne [5]. Dans les zones à sismicité modérée, comme la Belgique, la période de retour de tels séismes, qui sont destructeurs sur l'ensemble du territoire, est de l'ordre d'un à quelques siècles, ce qui explique que ces phénomènes naturels sont pratiquement absents de la mémoire collective.

Parmi ces événements sismiques, celui du 18 septembre 1692 est vraisemblablement le plus important connu ayant affecté le nord-ouest de l'Europe. La figure 3 indique la répartition des dégâts et la manière dont le tremblement de terre a été ressenti. Des courbes d'égale intensité, correspondant aux degrés V, VI et VII-VIII ont été représentées en optant pour une vision minimaliste des effets du séisme. La carte prend en compte les informations provenant de 185 sources historiques inventoriées à ce jour. Ces sources sont toutes originales et contemporaines des faits. La figure 3 montre également que les effets de ce séisme, correspondant aux différents degrés d'intensité, ont été ressentis sur une aire beaucoup plus importante que pour le séisme de Roermond en 1992, dont la magnitude s'élève à 5.4. La magnitude du séisme de 1692 a été évaluée à 6 ¼ par cette comparaison de la dimension des zones affectées avec celles de tremblements de terre récents pour lesquels une magnitude a été déterminée à partir d'enregistrements instrumentaux.

En examinant la carte, on constate qu'on dispose de peu d'informations sur les effets du séisme en Allemagne. Ceci résulte probablement du fait que peu de recherches critiques y ont été entreprises.

La carte des dégâts montre que les destructions sont très étendues, du Kent en Angleterre à la Rhénanie et à la Champagne centrale. Ce tremblement de terre est un des plus importants ressentis durant l'époque historique en Angleterre, bien que ce pays se situe à la périphérie de la zone de perceptibilité du séisme.

L'estimation de l'intensité dans la zone épiscopale pose des problèmes dus au manque d'informations précises sur la vulnérabilité des constructions, le degré des dégâts ainsi que la quantité des constructions affectées. De même, les édifices comme les églises ou les châteaux, qui sont généralement ceux pour lesquels on dispose du plus grand nombre d'information, n'entrent pas en ligne de compte dans la description des dégâts sur l'échelle EMS-98.

La relation de l'événement dans la zone épiscopale, la région de Verviers, indique une intensité importante supérieure à VII, et il n'est pas impossible que l'intensité IX ait été atteinte.

L'intensité VIII dans l'échelle EMS-98 correspond à une défaillance sérieuse des murs ainsi qu'une défaillance structurale partielle des toits et des planchers pour de nombreuses constructions de mauvaise qualité et quelques constructions saines. Les constructions les moins solides peuvent subir un effondrement total ou presque total. De bonnes constructions peuvent déjà subir des dégâts sensibles à importants. Les mouvements du sol sont si forts que la plupart des personnes ont des difficultés à se tenir debout, même à l'extérieur.

L'intensité IX correspond à des destructions généralisées dans les constructions de mauvaise qualité, mais également des dégâts structuraux importants dans de bonnes constructions. La violence des secousses provoque une panique générale et des personnes peuvent être projetées sur le sol. On peut même observer des vagues sur des terrains peu consolidés.

Voici quelques descriptions des effets du tremblement de terre, reprises de la publication d'Alexandre et Kupper [6].

A Ensival "*plusieurs maisons furent écrasées*": une intensité de VII semble être un minimum.

A Soiron "*tremblement de terre espouvantable qui a abbatu les maisons, cheminées dont les miennes l'ont esté et le chasteau de Soiron gasté et irréparable*" [...] "*et, fait à fait qu'il (le tremblement) s'avançoit on voyait hausser la surface de la terre, en sorte que plusieurs personnes et animaux en furent culbutez...*" : VII - IX.

A Andrimont, les habitants envoient une supplique au prince-évêque pour restaurer l'église: "*Elle menace ruine et culbute, le mouvement ayant fait bouger plusieurs bois et bouttans, et déhotté le toit.*"

A Walhorn, le curé note: "*In diversis locis domus fuerunt eversae et homines occisi. Castrum de Crapoel plane deperditum.*" ("En des lieux divers, des maisons ont été renversées et des hommes tués. Le château de Crapoel a été détruit complètement"). Sur la ferme du château, qui a été reconstruite, figure la mention "*1692. Terrae motu dirutum reaedificarunt 1698*" (1692. détruit par le tremblement de terre, ils le reconstruisirent en 1698): VII - IX.

A Polleur aucune cheminée n'est épargnée: "*In dem Dorfe Bleuer...war nicht ein Schornstein ganz geblieben...*": VII - VIII.

A Huy, le greffier de la Cour d'Ahin note: "*... Les oscillations du sol furent si fortes, qu'elles renversèrent les bêtes de somme dans les étables. Les briques de presque toutes les cheminées furent projetées à terre, entraînant dans leur chute des ardoises et des tuiles ...*" : VII - VIII.

Ces quelques descriptions montrent qu'en l'absence de mesures préventives adéquates dans nos régions, les conséquences d'un futur séisme de ce type pourraient être très importantes en terme de destruction et de coût humain et économique.

Le tremblement de terre à Liège en 1983 a montré la nécessité d'une surveillance de l'activité sismique dans nos régions. Un réseau sismique moderne a progressivement été installé par l'Observatoire Royal de Belgique à Uccle. Il comporte (figure 4)

actuellement 24 stations sismiques et 16 stations accélérométriques permanentes. Les stations sismiques permettent d'enregistrer et localiser avec précision tout tremblement de terre en Belgique, même de faible magnitude, tandis que les stations accélérométriques sont destinées à fournir un enregistrement non saturé des mouvements du sol provoqués par les séismes plus importants. Ce réseau permet de fournir rapidement toutes les informations concernant les événements sismiques ressentis dans nos régions et peuvent contribuer ainsi à permettre une mise en œuvre rapide des secours aux endroits adéquats lors de séismes destructeurs. Le lecteur peut consulter le site internet <http://www.astro.oma.be/SEISMO/index.php> pour trouver les signaux sismiques en temps réel des stations d'Uccle et de Membach, la base de données et toutes les informations disponibles sur l'activité sismique dans nos régions ainsi que le questionnaire individuel à remplir lors d'un séisme pour décrire la manière dont il l'a ressenti [7].

3. L'aléa sismique et l'influence de la géologie locale

Les études menées concernant l'activité sismique dans nos régions sont donc importantes en terme de prévention des effets des tremblements de terre. Ces études ne concernent pas uniquement les événements enregistrés par les stations sismiques, mais aussi les recherches dans les archives historiques sur les tremblements de terre plus anciens et les études se rapportant à l'identification et à l'étude de l'activité récente des failles actives [5].

La carte de la figure 5 indique la localisation de tous les tremblements de terre connus en Belgique et dans les régions avoisinantes. Elle nous indique que notre pays se trouve bien dans une région où l'activité sismique est loin d'être anecdotique.

Pour prévenir les effets de futurs tremblements de terre sur les constructions, l'ingénieur a besoin de connaître les caractéristiques des mouvements du sol provoqués par des séismes susceptibles de se produire durant leur durée de vie, c'est l'aléa sismique. Le rôle du sismologue est de fournir les informations qui permettent de définir un modèle prédictif aussi fiable que possible de ces mouvements. Malheureusement, il faut bien garder à l'esprit que les incertitudes restent très importantes. D'une part, la connaissance de l'activité sismique dans nos régions est incomplète comme l'indique la localisation des tremblements de terre de magnitude supérieure à 5.0 (figure 5). La plupart d'entre eux se sont produits en des endroits différents les uns des autres et il est probable que le prochain événement destructeur se produira en un endroit partiellement inattendu. Ceci montre que les modèles d'activité sismique conservent une part d'incertitude quant à l'extension des zones sismiques et à leur taux d'activité.

D'autre part, la complexité et la variabilité des mouvements sismiques sont également telles que les mouvements du sol ne peuvent être prédits avec précision, pour un modèle déterminé de tremblement de terre. Malgré les nombreuses avancées dans les recherches en sismologie de l'ingénieur, on est toujours obligé de quantifier l'aléa en utilisant des formules simplificatrices, avec des paramètres simples de mouvements du sol ou tout autre paramètre physique permettant d'évaluer la vulnérabilité d'une structure. Dans ces formules, l'écart type sur la variable considérée du mouvement du sol est du même ordre de grandeur que la moyenne. Le paramètre qui est généralement considéré est l'accélération maximale a_{gR} (accélération maximale de référence) ou PGA (Peak Ground Acceleration en anglais) au niveau du bedrock.

Valeur moyenne de a_{gR} (en g)	0.059	0.070	0.085	0.106	0.127	0.150	0.184	0.210
a_{gR} à une déviation standard (en g)	0.105	0.126	0.150	0.187	0.225	0.266	0.327	0.373

Il est admis que pour les constructions courantes, la carte d'aléa sismique doit indiquer les valeurs d'accélération horizontale qui ne seront pas dépassées avec une probabilité de 90% dans les 50 prochaines années, ce qui correspond à une période de retour de 475 ans. Sur les cartes traditionnelles d'aléa sismique, les valeurs indiquées sont celles ressenties en considérant que le rocher affleure en surface.

Une carte d'aléa de la Belgique (figure 8) a été calculée pour l'application du code de constructions parasismiques Eurocode 8 par Leynaud et al. [8]. A partir de ce document, une carte de zonage sismique a été établie. Elle indique (figure 9) trois zones dans lesquelles les accélérations horizontales maximales a_{gR} au niveau du bedrock sont respectivement 0.1 g (zone II), 0.05 g (zone I) et 0 g (zone 0) ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$). Il est important de noter que la carte d'aléa sismique ne tient pas compte de l'effet de site qui modifie l'amplitude, la durée et le contenu fréquentiel des mouvements du sol à cause de la structure géologique locale (épaisseur des couches de sol peu consolidés, topographie,...). On tient compte de l'effet de site à l'aide d'un coefficient S adéquat, de sorte que l'accélération maximale en base d'une structure vaut $a_{gR} \cdot S$, S étant compris entre 1 (bedrock en surface) et 1,8 (sol sans cohésion de densité faible à moyenne).

Pour les constructions plus critiques par la nécessité de leur usage après séisme (hôpitaux, casernes de pompiers, etc) ou pour les effets secondaires néfastes de leur effondrement (installations chimiques « Seveso », centrales nucléaires, etc), on doit considérer un séisme plus important, ce qui se fait par l'introduction d'un coefficient γ_I d'importance de la construction supérieur à 1, de sorte que l'accélération maximale à considérer (a_g) vaut alors $\gamma_I \cdot a_{gR} \cdot S$.

Le code Eurocode 8 donne des valeurs standards du coefficient S associé aux différents types de sol. Cependant, les types de sol définis dans l'Eurocode 8 ne considèrent que les épaisseurs de sol inférieures à 30 m. Aussi est-il utile de réaliser une étude spécifique des effets de site lorsque la couche de sédiments « mous » est plus épaisse. Cette étude permet d'établir la valeur de S avec plus de précision. Elle est de toute façon recommandée quel que soit le type de sol pour les installations critiques et les structures de dimensions importantes.

4. Séismes et constructions.

4.1. Effets de l'action sismique sur les constructions.

Les sollicitations sismiques des constructions ont pour origine les mouvements du sol provoqués par le tremblement de terre. Ces mouvements sont horizontaux et verticaux, mais les effets les plus dommageables résultent des déplacements horizontaux ; les effets de ce type à prendre en compte sont équivalents à l'application de forces horizontales (voir F1 à F4 sur la Figure 10) dont la résultante F_b est proportionnelle à la masse m du bâtiment et à l'accélération a_g de la zone. La valeur de calcul de cette résultante vaut environ $F_b = 1,4 \cdot m \cdot \gamma_I \cdot a_{gR} \cdot S$ (S est le coefficient de site&sol défini au paragraphe 3).

Les mouvements du sol entraînent des oscillations du bâtiment par rapport à sa base. La capacité d'une construction à reprendre l'action d'un séisme se traduit par l'existence d'un système logique de reprise des actions horizontales. Tous les bâtiments constituent des « boîtes », dont le fonctionnement général est schématisé à la Figure 11 et dont la stabilité implique le respect des 3 conditions suivantes:

- Une résistance adéquate des plans constituant la boîte :
 - Contreventements verticaux: murs, triangulations, portiques
 - Contreventements ou diaphragmes horizontaux : planchers, toitures, ...
- Un choix convenable de ces plans, tel que la géométrie globale de la boîte reste inchangée lors des mouvements sismiques : limitation des mouvements hors plan; ceci demande :
 - Un nombre convenable de plans de contreventement verticaux et horizontaux.
 - Une bonne disposition relative de ces plans
- Des liaisons adéquates entre ces plans.

Il est possible d'effectuer le calcul des sollicitations (forces, déplacement) dans une structure soumise à séisme par une analyse adéquate et de donner aux éléments résistants des dimensions convenables, quelle que soit l'architecture générale choisie [10][11]. Mais dans le contexte sismique, les meilleurs projets sont obtenus en respectant les « principes de conception » résumés ci après.

4.2. Principes de conception parasismique.

Le respect des principes de conception parasismique a pour résultat principal de minimiser le supplément de prix nécessaire pour passer d'une structure ordinaire à une structure parasismique. Les principes s'appliquent à la structure résistante du bâtiment, pas à ce qui en fait l'apparence. Les silhouettes esquissées dans les points suivants expriment les principes à respecter. La liberté de l'architecte reste évidemment grande.

- **Simplicité.**

Le comportement d'une structure simple est plus facile à comprendre et à calculer; le risque d'omettre un phénomène particulier est faible. La simplicité d'ensemble concourt à la simplicité des détails.

- **Continuité.**

Toute discontinuité dans une structure conduit à une concentration de déformations engendrant facilement des dégâts locaux qui amorcent des dégâts plus globaux.

Ce principe se traduit dans les détails de structure. Ainsi il convient d'éviter l'absence de liaison positive : des éléments porteurs de plancher simplement posés ne sont tenus en place que par le frottement et peuvent se désolidariser des appuis. Ce principe se traduit aussi dans la surveillance de chantier : bétonnage des joints d'assemblage, mise en place des armatures, l'exécution des reprises en béton armé, qualité des matériaux.

Le principe de continuité a un impact sur le dessin d'ensemble des structures, défini dans les principes suivants.

- **Régularité en plan.**

On ne connaît pas a priori la direction du mouvement sismique et la structure doit pouvoir résister à des actions horizontales de direction quelconque. La forme idéale est symétrique. Des dégâts ont souvent été observés dans les structures composées de plusieurs plans perpendiculaires. Figure 12.a.

- **Régularité en élévation.**

La régularité de la structure primaire en élévation est souhaitable.

Elle implique une distribution continue et uniforme des éléments résistants verticaux, colonnes ou murs structurels, et évite la situation d'étage « mou » schématisée à la Figure 13. Les niveaux transparents sont courants au rez de chaussée des bâtiments en raison de l'usage : commerces, bureaux, réception, parking ; ils sont déconseillés dans les zones sismiques car ils peuvent constituer des niveaux flexibles, dans lesquels se concentrent toutes les déformations de la structure.

On peut estimer qu'au niveau mondial, 90% des effondrements de bâtiments et 90% des victimes lors de séismes (effet de tsunami exclu) ont pour cause l'existence non gérée de « niveaux transparents ».

Les « niveaux transparents » non gérés sont communs dans les villes belges : rez de chaussée commerciaux développés dans des bâtiments anciens par exemple (Figure 14). La solution est de conférer à ces niveaux ouverts une rigidité et une résistance comparable à celle des autres niveaux, par exemple en créant un portique (cadre fermé) résistant en façade, de loin préférable à la simple insertion d'une poutre pour former une baie.

- **Raideur et résistance à la torsion.**

Un séisme soumet un bâtiment à des sollicitations de torsion et il faut assurer une résistance à la torsion convenable. Des contreventements disposés en périphérie produisent un effet maximal. Une disposition à un seul noyau (cage d'escalier, ascenseur) peut être insuffisante. Une position décentrée des éléments de contreventement est à l'origine d'une sollicitation du bâtiment en torsion. Figure 12.b.

- **Des éléments structuraux verticaux surdimensionnés.**

La ruine des éléments structuraux verticaux d'un bâtiment a un impact nécessairement catastrophique, car elle entraîne la chute d'un étage, qui entraîne à son tour souvent l'effondrement total de la structure.

- **Diaphragmes efficaces.**

Les diaphragmes d'un bâtiment sont les structures horizontales qui reportent l'action horizontale vers les structures verticales de contreventement. Ils doivent être peu déformables dans leur plan. Idéalement, ils assurent à chaque niveau où ils sont présents une absence de déplacement horizontal relatif entre les structures verticales.

Le rôle de diaphragme est joué par la toiture et par les planchers. Les liaisons d'un diaphragme aux contreventements verticaux assurent le transfert de l'action horizontale du niveau considéré.

L'absence de diaphragme efficace dans les constructions traditionnelles en maçonnerie explique les séparations de murs qu'on observe après séisme : les planchers en bois sans chaînage n'empêchent pas l'écartement relatif des murs. 80 % des 75 millions d'Euro de dégâts causés par le séisme de Liège (1983,

magnitude 4,7...) résultent de ce défaut de structure horizontale. Figure 15. et 16. Des planchers en béton, plus lourds, mobilisent à leurs appuis une résistance par frottement et par engrènement des matériaux qui peut constituer une liaison suffisante pour les séismes faibles.

- **Choix rationnels relatifs aux masses.**

La résultante de forces appliquée à un bâtiment peut être réduite en réduisant sa masse m . Le choix de solutions légères réduit les coûts d'ossature et de fondation.

- **Largeur des contreventements et fondations.**

Les forces horizontales équivalentes au séisme sont équilibrées en base de la structure par une résultante de cisaillement et un moment de flexion. Ce dernier entraîne des tractions et des compressions dans les poteaux ou voiles. On peut réduire les contraintes correspondant à ces sollicitations dans la structure et à la fondation en élargissant le contreventement: le bras de levier des efforts est augmenté, ce qui réduit les sollicitations.

Il est intéressant, pour réduire les sollicitations à la fondation, de préférer un radier général raidi par des murs en béton armé à de multiples fondations sur semelles.

- **Fixation des éléments non structurels.**

La première cause de mortalité en cas de séisme de faible intensité est la chute d'éléments non structurels mal fixés ou peu résistants placés en hauteur : cheminées, éléments décoratifs de façade, cloisons et séparations intérieures simplement posées et non tenues en haut, vitrages, bibliothèques, équipements techniques, etc...

La figure 16.c, une photo prise en zone de faible séismicité (Liège, 1983), situe ce problème.

- **Homogénéité et partition en sous-structures.**

Idéalement, le système porteur d'un bâtiment devrait être homogène. Dans le cas contraire, on devrait fractionner le bâtiment en plusieurs unités distinctes par des joints parasismiques ; le système porteur peut varier d'une unité à l'autre, mais est homogène dans chacune d'elles.

- **Résistance des éléments de l'ossature aux efforts alternés.**

Un tremblement de terre engendre des efforts alternés dans la structure. Les zones les plus sollicitées doivent pouvoir subir des déformations plastiques alternées sans perte de résistance (ductilité).

- **Hyperstaticité et un mécanisme plastique global.**

L'hyperstaticité d'une structure augmente la résistance d'un bâtiment aux séismes, car en général la rupture d'éléments individuels bien choisis n'entraîne pas d'effondrement global. Le principe « poteaux forts – poutres faibles » pour la formation des rotules plastiques dans les poutres plutôt que dans les colonnes des ossatures en portique est un exemple de choix des éléments structurels où on veut développer des déformations plastiques.

- **Remarque.**

Les principes qui viennent d'être présentés sont essentiellement de nature architecturale. Les considérer au moment de la conception fait partie de la mission normale d'un architecte.

Les deux derniers principes énoncés portent davantage sur des aspects relatifs à l'art de l'ingénieur et on se reportera à d'autres références pour des explications complètes [12][15][17].

4.3. Aspects spécifiques de conception parasismique pour les bâtiments non ingénierés.

Dans les constructions non ingénierées (maisons d'habitation) les dégâts les plus importants lors de tremblements de terre résultent:

- du manque de murs dans la direction parallèle au mouvement sismique
- du basculement des murs perpendiculaires à l'action sismique
- du manque de liaison entre murs, entre murs et planchers, ainsi qu'entre toiture et murs.

POUR PREVENIR CES TROUBLES, LE CODE PARASISMIQUE EUROPEEN EUROCODE 8 (VOIR SECTION 6) DÉFINIT DES RÈGLES.

Des murs de contreventement doivent être prévus dans au moins deux directions orthogonales ; leur épaisseur t_{ef} , ne peut pas être inférieure à une valeur minimale définie. Dans le cas des constructions simples (c'est-à-dire respectant les principes architecturaux de conception parasismique), la section des murs orientés dans chaque direction principale du bâtiment ne peut être inférieure à des dimensions minimales définies dans le Tableau suivant

Table 2. Recommandations relatives au nombre maximal admissible d'étages au-dessus du sol et à l'aire minimale des murs de contreventement pour les "bâtiments simples en maçonnerie".

Accélération sur site $a_{g,S}$		$\leq 0,07 \text{ g}$	$\leq 0,10 \text{ g}$	$\leq 0,15 \text{ g}$	$\leq 0,20 \text{ g}$
Type de construction	Nombre d'étages (n)**	Somme minimale de sections transversales de murs de contreventement horizontaux dans chaque direction, en pourcentage de la surface totale par étage ($p_{A,min}$)			
Maçonnerie non armée	1	2,0 %	2,0 %	3,5 %	n/a
	2	2,0 %	2,5 %	5,0 %	n/a
	3	3,0 %	5,0 %	n/a	n/a
	4	5,0 %	n/a*	n/a	n/a

*n/a signifie "non acceptable".

** L'espace du toit (comble) au-dessus des étages complets n'est pas pris en compte dans le nombre d'étages.

Tout type de plancher peut être utilisé, à condition de respecter les exigences de continuité et de diaphragme.

Les bâtiments doivent être constitués de planchers et de murs liaisonnés.

Afin d'évaluer quelles liaisons étaient nécessaires dans le contexte wallon, des recherches ont été effectuées à l'Université de Liège [9] afin d'établir les ordres de grandeur des efforts engendrés par un tremblement de terre modéré aux liaisons entre éléments porteurs qui forment la « boîte » que constitue une construction non ingénierée en maçonnerie. Ces efforts permettent de dimensionner les liaisons mur-mur, mur-plancher, mur-toiture de la construction et d'assurer un bon comportement sous séisme « belge ».

Un échantillon de maisons unifamiliales réelles a été rassemblé ; leurs structures ont été modélisées numériquement et soumises à des secousses, correspondant à des séismes caractérisés par une accélération a_g sur le rocher de 0.1 g (zone 2) et un sol défavorable (facteur $S = 1,6$), auquel correspond des accélérations à la fondation égales à $a_g S = 0,16$ g et des accélérations spectrales maximales de 0,27 g.

Deux exemples des maisons étudiées sont montrés sur la Figure 17. Le tableau suivant donne un exemple de résultats.

Table 3. Efforts F_{pm} aux liaisons plancher - mur.

Type de plancher	F_{pm} moyenne [kN/m]	F_{pm} pic [kN/m]
planchers diaphragmes liaisonnés sur les 4 côtés	10	30
planchers diaphragmes liaisonnés sur 2 côtés	20	110

Sur base de ces résultats, un ensemble de détails constructifs parasismique pour constructions non ingénierées ont été calculés et dessinés [9].

5. Le risque sismique en Belgique.

5.1. Introduction.

Le risque sismique, c'est-à-dire l'évaluation des conséquences des tremblements de terre futurs en terme d'atteinte aux personnes, de dégâts aux bâtiments et aux infrastructures et de perturbation de la vie économique, existe dans pratiquement toutes les régions de Belgique. Il est plus élevé dans les 2 régions de Wallonie reportées en zone 2 de la carte de zonage sismique de la Belgique (figure 9).

Une évaluation systématique du risque sismique futur devrait tenir compte du « séisme de calcul » défini dans la norme NBN-ENV 1998-1-1: 2002, des particularités géologiques locales, du bâti existant, du coût de réparation ou de remplacement des constructions affectées. Une telle évaluation n'existe pas encore, mais elle est possible. En effet, une étude pilote limitée à 4 km² de la ville de Liège a été menée en 2000 par l'Université de Liège, à l'instigation et avec le support de la Région Wallonne [13]. Cette étude pilote était destinée à étudier à la fois le risque sismique dans la zone considérée et les problèmes de réalisation d'études du risque sismique, sur les plans méthodologiques et scientifiques. La démarche et les résultats sont résumés ci-dessous.

5.2. Synthèse d'une étude pilote du risque sismique sur une partie de la ville de Liège.

- **Support géographique.**

Le nombre de bâtiments dans la zone d'étude de (2 km x 2 km) est de 6406. L'approche doit par conséquent être systématique. Elle implique un logiciel d'information géographique (GIS) et des données cartographiques (IGN). Chaque bâtiment de la zone d'étude est repéré par sa latitude et sa longitude. A chaque point ainsi défini sont associées différentes données établies dans l'étude : l'accélération en base du bâtiment ou « aléa local », la vulnérabilité du bâtiment, le risque sismique calculé, l'adresse, etc. Le système permet de tracer des cartes représentant tous ces paramètres.

▪ **Alea sismique considéré.**

L'alea sismique considéré au niveau du bedrock est celui qui a servi de base à la carte de zonage reprise dans la NBN-ENV 1998-1-1: 2002. Il correspond à 2 types de tremblements de terre, l'un de magnitude $M_S = 5,5$ dont le foyer est situé à faible profondeur (5 km) à Liège (comme dans le tremblement de terre de Liège en 1983) et l'autre de magnitude $M_S = 6,5$ situé dans le Graben de la Roer ou le nord de l'Ardenne à une distance de 40 km de Liège (type Verviers 1692). Les accélérogrammes des deux tremblements de terre au niveau du rocher ont été générés. Puis les couches du sous-sol ont été prises en compte pour établir l'alea sismique local au niveau de la fondation des bâtiments. A cette fin, la zone d'étude a été divisée en un maillage de cellules carrées de 20 mètres sur 20 mètres, soit au total 10 000 cellules. A l'intérieur de chacune de ces cellules, l'ensemble des caractéristiques de chaque sol a été défini et la fonction de transfert des accélérations entre le bedrock et la surface a été constituée. L'accélération maximale dans chaque maille est déterminée pour les 2 séismes considérés et stockée dans un fichier. On présente à la Figure 18 la carte de l'alea local ainsi établi dans la zone d'étude.

▪ **Vulnérabilité.**

Les dégâts subis par un bâtiment d'un type donné (Ex.: maison unifamiliale) sous un tremblement de terre déterminé peuvent être plus ou moins grands. La vulnérabilité d'un bâtiment d'un type donné dépend des caractéristiques de celui-ci. La vulnérabilité est quantifiée par un « indice de vulnérabilité » I_v , calibré sur base des dégâts observés lors de tremblements de terre réels (GNDT, Italie). Cet indice a donc une base statistique. Il permet de caractériser la vulnérabilité de chaque bâtiment par un relevé de données de la structure (régularité en plan, présence d'ouvertures, matériaux, ...), puis d'estimer des dégâts, sans calcul structurel. Cette approche est un diagnostic rapide : quelques dizaines de minutes suffisent pour établir l'indice I_v d'un bâtiment. Des relations de calcul de l'indice I_v ont été établies en adaptant la méthode GNDT au contexte du bâti belge. Des formulaires d'enquête, conçus pour relever rapidement les observations permettant d'établir l'indice I_v d'un bâtiment, ont été développés.

4 types de bâtiments, auxquels on associe un indice de vulnérabilité I_v de base, sont distingués :

- Maisons en maçonnerie avec plancher en bois (absence de diaphragme efficace),
 $I_v = 42$ pour une maison dans une série;
 $I_v = 52$ pour une maison d'angle ou en fin de série
- Immeubles multiétagés de plus de 5 étages en mixte béton armé-maçonnerie,
 $I_v = -5$ pour une maison dans une série;

- $I_v = -20$ pour une maison d'angle ou en fin de série
- Immeubles historiques isolés,
 $I_v = 42$.

Des paramètres "modificateurs" des indices I_v de base sont définis. Ces paramètres sont représentatifs de l'influence de circonstances modifiant la vulnérabilité : pourcentage d'ouverture, niveau transparent, balcons lourds, irrégularité en plan ou en élévation.

On obtient ainsi des tableaux qui permettent l'attribution directe, à chaque bâtiment inspecté visuellement, d'un indice I_v , somme d'une valeur de base et de modificateurs.

▪ **Risque.**

Le risque est quantifié par un facteur d de dommage, défini comme le rapport entre le coût de réparation et le coût de remplacement du bâtiment. La relation utilisée pour évaluer le risque (dommage d à un bâtiment) en fonction de l'aléa local (accélération a_{max} à la fondation) et de la vulnérabilité (indice I_v) est présentée à la Figure 19. Cette relation a été calibrée par des observations après séisme (1976 Friuli, 1984 Abruzzes). Par exemple, pour une accélération a_{gr} ou $a_{max} = 0,2$ g et un indice de vulnérabilité donné $I_v = 60$, le dommage d est égal à 80%. Le dommage d calculé pour chaque bâtiment est reporté sur carte. Figure 20. Des statistiques sont également calculées : nombre de bâtiments qui subissent des dégâts dont le coût de réparation dépasse 40% du coût d'une construction nouvelle, etc.

▪ **Résultats de l'étude en terme de risque sismique.**

Sous le séisme de projet, c'est-à-dire le séisme qui doit être considéré dans la région de Liège lors de l'étude d'un bâtiment nouveau pour lui assurer un comportement convenable, la ville de Liège subit des dégâts considérables : 45% des bâtiments sont complètement détruits, 20% sont réparables pour un coût inférieur ou égal à 60% du coût de remplacement et 7% seulement subissent des dégâts réparables pour un coût inférieur à 40% du coût de remplacement.

Cette conclusion n'est pas anormale, car les accélérations à la fondation sont élevées, entre 0,15 g et 0,40 g, ce qui est comparable à des régions très sismiques en Italie (Catania: 0,15 à 0,35 g).

De plus, ce constat est cohérent avec les indications du Tableau 2, qui fut défini après l'étude de risque sur Liège et indépendamment de celle-ci: les bâtiments reconnus « à problèmes » ne respectent pas les exigences de l'Eurocode 8, version EN1998 :2004, pour les niveaux d'accélérations établis.

L'importance des dommages résulte aussi du fait qu'une partie considérable du bâti est constitué de constructions peu résistantes aux tremblements de terre : maisons en maçonnerie, planchers en bois non liaisonnés aux murs. Un aspect particulier du bâti concourt à la situation négative décrite : dans la zone marchande du centre ville et dans de nombreux immeubles multiétagés, le rez-de-chaussée a un caractère structurellement faible, parce qu'on a enlevé les murs de façade et des murs intérieurs pour créer des espaces ouverts, sans compenser l'enlèvement des murs par la réalisation de portiques résistants.

Les constructions plus récentes, mieux liaisonnées et situées dans une zone où l'effet de site est plus faible (Cointe), constituent la partie du bâti qui subit sans trop de problèmes le tremblement de terre de projet.

Dans les constructions non ingénierées (maisons, petits bâtiments), des mesures constructives simples, comme celles présentées dans le guide parasismique belge pour maisons individuelles [9], peuvent modifier fortement, à peu de coût, la vulnérabilité des bâtiments. Ainsi, des liaisons adéquates des planchers ou des murs font diminuer l'indice de vulnérabilité I_v moyen de 50 à 25 et le niveau de dommage moyen de 77 % à 28% du coût de reconstruction.

De nombreux éléments non structurels tels que frontons en pierre de taille, cheminées, ... constituent un danger, comme observé lors du séisme de 1983 où nombre de ces éléments étaient tombés en rue (voir Figures 1 et 16).

▪ **Incertitudes.**

Des incertitudes affectent divers aspects de l'étude, principalement:

- Le niveau des mouvements du sol de référence, en raison des inconnues sur l'activité sismique et de la variabilité des mouvements de sol.
- La relation entre l'alea local, la vulnérabilité et le dommage; sa base statistique est large, mais correspond à des bâtiments qui ont été construits différemment (autres matériaux) et qui ont été dégradés sous un alea local qui n'est pas toujours connu avec précision.

De plus, la procédure d'établissement de l'indice de vulnérabilité a , pour des raisons budgétaires, été restreinte à un examen visuel en façade, dont la précision est forcément limitée. Si cette approche n'affecte pas les conclusions d'ensemble, elle peut par contre fausser certaines évaluations individuelles de bâtiments. Un examen de la structure de chaque bâtiment, plus détaillé que l'examen visuel en façade, est souhaitable et notamment un examen intérieur, un examen des plans pour les bâtiments multi-étagés et un examen détaillé des modifications apportées à la structure initiale.

6. La prévention du risque sismique en région wallonne.

6.1. Evolution des normes parasismiques et de leur application en Belgique.

Les considérations qui précèdent démontrent que des mesures de construction parasismique s'imposent en région wallonne. La prise de conscience de cette réalité s'est faite progressivement et a connu les étapes suivantes.

Avant 1994, il n'existait en Belgique aucune recommandation ou règlement relatif à des mesures de construction parasismiques pour la construction courante, bâtiments publics ou privés, ouvrages d'art, etc... Cependant l'existence d'une activité sismique était connue et certains Maîtres d'Oeuvre d'installations industrielles critiques (chimie, nucléaire) ou d'ouvrages d'art particuliers (ascenseur à bateaux de Strépy) tenaient compte des séismes dans leurs études. Cette tendance s'accrut après le séisme de Liège en 1983, qui amena aussi à des calculs complémentaires pour des installations existantes (centrales nucléaires anciennes).

En 1994 parut une première version, dite provisoire ou ENV, d'un document normatif européen relatif aux projets de construction en zone sismique, l'Eurocode 8 (document ENV1998 : 1994). Ce document contient des données générales sur les objectifs du projet, sur l'action sismique et sur les calculs à effectuer pour vérifier la stabilité d'une construction soumise à séisme. Des chapitres par matériaux définissent des aspects et calculs spécifiques liés à ces derniers.

Pour avoir une portée utile, le document Eurocode 8 doit être complété par un « DAN », Document d'Application Nationale. Le DAN fut développé après 1994,

passa à l'enquête publique et devint officiel en 2002 sous l'appellation NBN-ENV 1998-1-1: 2002 . NAD-E/F/N. Avril 2002.

C'est à ce jour le seul document parasismique officiel en Belgique.

Il contient les informations suivantes :

- L'approbation du document ENV1998 dans son ensemble.
- des données additionnelles, en particulier une carte de zonage sismique (Figure 9), nécessaire pour définir une action de calcul dans un projet
- Pour quelques clauses, des précisions pour l'application de l'ENV1998 en Belgique.

Ce document est « en vigueur » en Belgique, au sens défini en 6.2.

Après 1994, des travaux de recherche se sont poursuivis dans toute l'Europe afin d'améliorer l'état des connaissances sous jacents aux Documents Normatifs. L'Université de Liège et l'Observatoire Royal de Belgique ont largement participé à cet effort de recherche « prénormative » dans des travaux financés par l'Union Européenne, la Belgique et la Région Wallonne. Ces travaux sont consignés dans des publications diverses, dont certaines sont orientées vers l'application pratique en projet [9], [14]. En particulier, [9], « Guide Technique Parasismique Belge pour Maisons Individuelles », constitue un document de recommandations pratiques. Diffusé en 2003 dans des séances d'information publique, il constitue un élément nouveau dans l'« état de l'art » en Belgique, puisqu'il apporte des éléments de recommandation pour les constructions non ingénierées en maçonnerie, sujet abordé de façon très liminaire dans l'ENV1998 : 1994.

En 1999, le travail de conversion de la version provisoire ENV de l'Eurocode 8 en un document EuroNorme EN a été entrepris. Ce travail est pratiquement terminé.

L'Eurocode 8 actuel comprend 6 parties :

- EN1998-1, Partie 1 Règles générales, actions sismiques, bâtiments, 208 p.
- EN1998-2, Partie 2 Ponts, 137 pages.
- EN1998-3, Partie 3 Renforcements et réparations, 76 p.
- EN1998-4, Partie 4 Réservoirs, silos, pipelines, 58 p.
- EN1998-5, Partie 5 Fondations, soutènements, aspects géotechniques, 40 p.
- EN1998-6, Partie 6 Tours, mats, cheminées, 45 p.

Toutes ces Parties, à l'exception de la Partie 4, sont complètement élaborées.

Suivant les accord européens, l'Eurocode 8 EN1998, comme les autres Eurocodes, est appelé à remplacer les Normes Nationales dans un délai de 2 ans après sa parution officielle, cette mesure faisant partie de l'harmonisation générale des règles au niveau européen. Durant cette période de 2 ans, il peut être utilisé en parallèle aux normes en vigueur.

Pour rendre l'EN1998 opérationnel, une Annexe Nationale est en cours de développement en Belgique pour chacune des Parties mentionnées. Le contenu de principe des Annexes Nationales est similaire à celui des DAN définis plus haut. Les Annexes Nationales Belges devraient être finalisées en 2007, moment auquel on pourra dire que l'EN1998 est le document en vigueur.

6.2. Sur l'obligation d'appliquer l'Eurocode 8.

Comme toute Norme de l'Institut Belge de Normalisation, le contenu du document Eurocode 8 définit sur le sujet donné un « état de l'art » que tout technicien compétent devrait connaître et appliquer.

Toutefois, à l'heure actuelle, l'application du document n'a pas de caractère obligatoire pour une construction donnée, sauf si cette obligation est explicite dans le cahier des charges de la construction ou dans le règlement d'urbanisme en vigueur dans la région de construction.

Si cette obligation n'est pas explicite, l'auteur de projet qui n'a pas pris en compte l'action sismique n'aura pas de problème, sauf si un tremblement de terre survient et cause des dégâts. Alors, on pourra lui reprocher d'avoir ignoré l'état des connaissances au moment de la construction, ce qui n'est pas admis pour un technicien compétent. Au final, il pourrait se voir contraint à indemniser son client.

6.3. Sur les moyens de faire appliquer la norme parasismique aux constructions nouvelles.

Pour faire appliquer la norme parasismique dans les projets de constructions nouvelles, il faut créer un ou des incitants. Comme il n'est pas de pratique courante en Belgique de donner force de loi à des normes techniques, la méthode la plus réaliste consiste à inscrire ce souci dans le règlement d'urbanisme, ce qui est du ressort de la Région Wallonne.

D'autres pays ont mis en pratique d'autres approches, ou plutôt des incitants additionnels. Ainsi, depuis 2004, l'Algérie oblige le maître d'œuvre d'une construction nouvelle à faire valider le projet et son exécution par la délivrance d'un certificat parasismique, établi par un bureau indépendant. Sans ce certificat, le propriétaire se verra refuser tout contrat d'assurance pour son bâtiment et il lui sera interdit de le vendre. C'est évidemment un incitant puissant au sérieux dans la construction, en particulier au niveau des promoteurs immobiliers...

Une situation similaire pourrait se créer de fait en Belgique, suite à l'assurance obligatoire contre les risques naturels incluant les séismes. On peut concevoir que les assureurs vont, pour minimiser leur risque financier, mettre la pression sur les auteurs de projet afin que ceux-ci veillent au caractère parasismique de leurs études.

6.4. Sur les moyens de faire appliquer la norme parasismique au bâti existant.

La plus grande partie du risque sismique en Belgique vient du bâti existant.

Il est techniquement possible de mettre à niveau une construction existante, c'est-à-dire la renforcer pour assurer sa résistance au séisme de projet défini dans la région. La Partie 3 de l'Eurocode 8 est dédiée à cette problématique.

Cependant, exiger qu'un tel renforcement des structures soit effectué de façon systématique pose un problème économique énorme et ne peut être raisonnablement envisagé. Comme on l'imagine, le surcoût du parasismique en intervention a posteriori est sans commune mesure avec le surcoût en projet nouveau. De plus, une balance économique devrait être faite entre le coût global probable des effets d'un séisme affectant un ensemble de constructions dans une zone limitée et le coût global de mesures de renforcement appliqué à tout une région ou tout un pays; il n'est pas certain que le renforcement soit l'approche la plus économique.

Mais il est assez frustrant de ne rien faire. Chaque propriétaire est évidemment libre de décider spontanément une évaluation de son immeuble et de réaliser son éventuel renforcement. L'autorité publique peut raisonnablement entreprendre trois actions.

La première action concerne les constructions existantes dans lesquelles des transformations structurales sont entreprises. Il conviendrait d'exiger une étude de stabilité effectuée par un bureau d'ingénieurs, afin :

- au minimum, de garantir que la transformation effectuée ne réduit pas la résistance au tremblement de terre de la construction concernée; c'est loin d'être le cas dans la réalité actuelle
- idéalement, de profiter de la transformation effectuée pour relever le niveau de résistance sismique de la construction concernée.

La deuxième action combine étude de risque sismique et application de mesures préventives. Lorsqu'une étude du type décrit en 5 fait apparaître un niveau de risque significatif, cette information peut être donnée aux propriétaires d'immeubles et à la ville ou commune. L'autorité publique communale ou régionale pourrait alors proposer des incitants financiers aux propriétaires pour les aider à corriger la situation. Il faut noter que, dans certaines cas, le correctif pourrait consister en une seule intervention pour tout un ensemble de bâtiments contigus ; c'est le cas dans les centre ville où des rez de chaussée transparents ont été pratiqués dans une série de bâtiments voisins qui s'appuient les uns sur les autres ; une stabilisation aux deux bouts de la série peut être une approche efficace et moins perturbante qu'un renforcement individuel de chaque bâtiment.

La troisième action porte sur la réduction du danger présenté par les chutes de parements de façades, cheminées, fronton, etc. L'autorité publique communale ou régionale devrait s'attaquer à ce problème, de loin le moins coûteux à résoudre alors qu'il s'agit du danger le plus immédiat. L'action à entreprendre est un examen systématique de la stabilité des éléments décrits et l'imposition d'amélioration à réaliser dans un délai donné.

Le développement de règles pratiques de consolidation sera nécessaire, afin d'assurer l'efficacité des travaux et une homogénéité des exigences. Ce développement devra, dans un premier temps, se faire de façon interactive entre experts et applicateurs, afin de rencontrer les difficultés inévitables de cas particuliers.

Les trois actions mentionnées peuvent être entreprises de suite, mais leur efficacité prendra plus ou moins de temps à se réaliser.

La première action, une étude de stabilité parasismique obligatoire en cas de transformations, demande d'inclure cette règle dans le règlement d'urbanisme. La mesure devient efficace dès cette inscription. Néanmoins, l'étendue de cette action est quelque peu limitée, étant donné l'arrêté du Gouvernement Wallon du 27 octobre 2005. En effet, depuis son entrée en application le 3 décembre 2005, le recours à un architecte n'est plus obligatoire pour toute une série d'actes et travaux. Ces travaux sont notamment :

- Le remplacement de châssis, de parement ou de toiture,
- L'ouverture ou la modification de baies (à dominantes verticales),
- La construction ou le remplacement d'un volume secondaire, contigu au corps principal du bâtiment et pouvant être destiné à l'habitation.

Or, ces travaux concernent des éléments de construction identifiés comme sujets à dommages en cas de séisme (chute de parement, de cheminées, ...). Dès lors,

l'intervention d'un architecte pour la conception et le contrôle du chantier paraît nécessaire.

La deuxième action suppose qu'une évaluation systématique du risque sismique soit menée, afin de disposer d'un outil d'aide à la décision en matière d'intervention de renforcement. Ensuite, elle suppose une volonté politique des pouvoirs publics de supporter des actions de renforcements parasismique.

La troisième action peut être initiée rapidement, mais elle demande une interaction entre inspecteurs des constructions et prescripteurs de renforcement qui peut, au début, ralentir l'exécution de travaux.

6.5. Une condition nécessaire à l'application des règles parasismiques : la formation.

A l'heure actuelle, la formation au projet parasismique ne fait pas partie du programme des cours de la majorité des écoles d'ingénieur et des écoles d'architecture. Il est évident que la mise en pratique des règles parasismiques demande qu'une telle formation soit dispensée, tant aux futurs diplômés qu'aux « anciens ».

Ceci implique tout logiquement une double mesure :

- Pour les futurs diplômés, il convient de définir un enseignement adéquat et de l'inscrire au programme des cours
- Il faut compléter cette mesure par la formation des formateurs aux problèmes de conception parasismique.
- Pour les ingénieurs et architectes déjà diplômés, il faut développer deux programmes de cours et deux certificats spécifiques, exigibles pour être auteur de projet parasismique.

7. Conclusions

Nous avons présenté différentes facettes du risque sismique en Belgique et diverses pistes pour la gestion de ce risque. Nous avons ainsi abordé l'aléa sismique, l'influence de la géologie locale, les principes de conception parasismique, la vulnérabilité du bâti existant et la prévention du risque sismique. Le risque sismique est une combinaison de l'aléa sismique et de la vulnérabilité.

D'abord, l'existence d'une activité sismique en Belgique et, en particulier, en Wallonie a été présentée. Les séismes de 1983 à Liège, de 1938 à la limite des Flandres et du Hainaut et de 1692 à Verviers ont été explicités, notamment en termes de dégâts. L'évidence d'un danger établie, la première étape consiste à évaluer l'aléa. Celui-ci se définit comme une probabilité de dépassement d'un certain niveau d'accélération du sol durant une période de T années. Lorsque la géologie locale est défavorable (sols meubles), les ondes sismiques risquent d'être amplifiées à certaines fréquences et l'aléa augmente.

Ensuite, un réseau de surveillance, constitué de stations sismiques implantées dans tous le pays par l'Observatoire Royal de Belgique, permet actuellement l'étude et la surveillance de l'activité sismique. Il devrait permettre de fournir une alerte et des informations importantes pour les secours en cas de séisme destructeur. Le réseau de stations accélérométriques, quant à lui, fournirait des enregistrements importants pour les ingénieurs et les architectes permettant de mettre en relation les mouvements forts du sol avec les dégâts observés. Dans cette optique, il ne serait pas déraisonnable d'installer de tels instruments au sein des structures à risque spécial.

Mais qu'en est-il des conséquences de ce tremblement de terre sur les bâtiments et les vies humaines ? Cette question a été examinée lors une étude pilote sur une partie de la ville de Liège (4km²), menée par l'Université de Liège. Les buts étaient non seulement d'évaluer le niveau de dommages potentiel, mais aussi d'évoquer les aspects scientifiques et méthodologiques de cette évaluation. Le risque a été évalué en termes de « dommage » (rapport entre les coûts de réparation et les coûts de la construction). L'étude a révélé des dommages considérables, en considérant un séisme type défini par la norme parasismique (Eurocode 8).

Ces résultats nous incitent à réagir. D'une part, pour les nouvelles constructions, des principes de conception parasismique ont été donnés, tant à l'attention des architectes que des ingénieurs. L'application de l'Eurocode 8 est également préconisée. D'autre part, pour les bâtiments existants, des actions ont été proposées pour la prévention du risque en région wallonne : une étude de stabilité obligatoire en cas de transformation, une évaluation du risque sismique comme outil d'aide à la décision et l'examen systématique des éléments les plus fragiles en vues de travaux consolidation.

Compte tenu de l'aléa sismique en Région Wallonne, du risque de dommages sur les bâtiments et compte tenu du fait que nous sommes en mesure de diminuer ce risque, il convient que chacun prenne conscience de son rôle dans la sauvegarde des vies humaines et du patrimoine bâti.

LE RISQUE SISMIQUE ET SA PREVENTION EN REGION WALLONNE : FIGURES



Figure 1. Dégâts typiques des tremblements de terre modérés dans le nord-ouest de l'Europe : détachement d'une façade de maison à Heinsberg (séisme de Roermond en 1992 – *Het Laatste Nieuws*, T. Van Galen) et l'écrasement d'une voiture par des débris de cheminée à Liège (séisme de Liège de 1983).

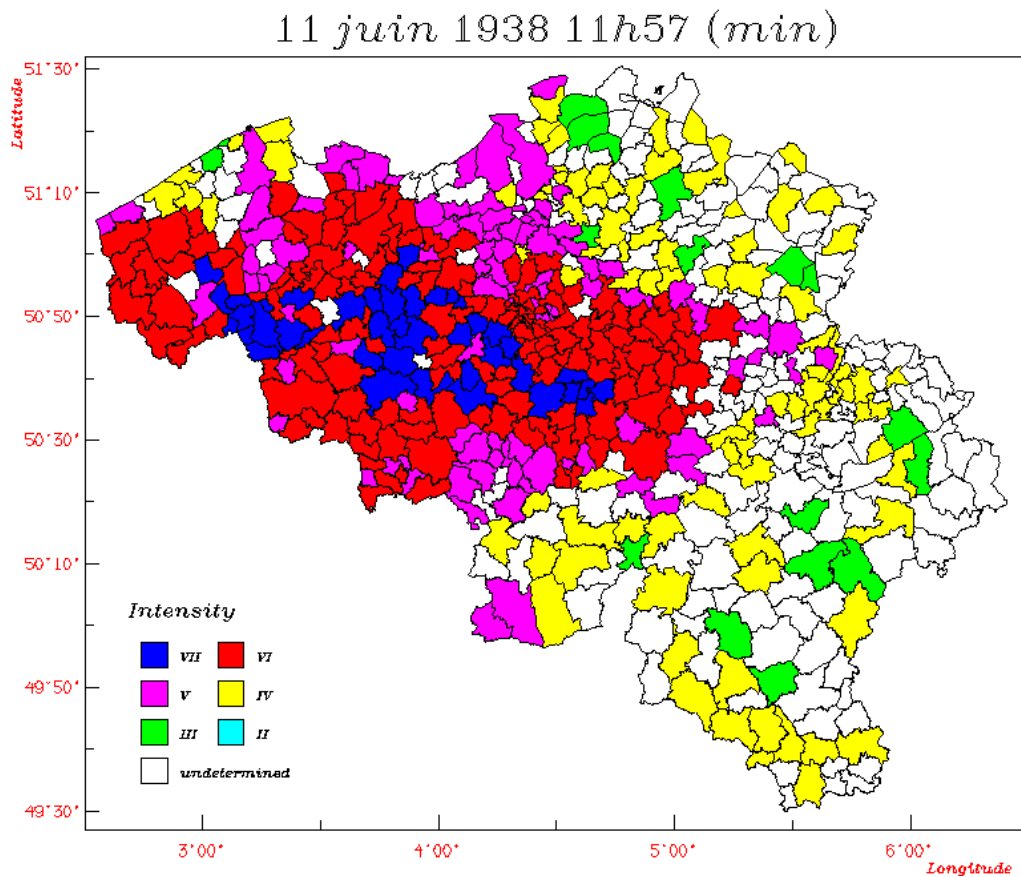


Figure 2. Données macroséismiques réévaluées (échelle EMS-98) pour le tremblement de terre du 11 juin 1938 ($M_S = 5.0$). Source [3].

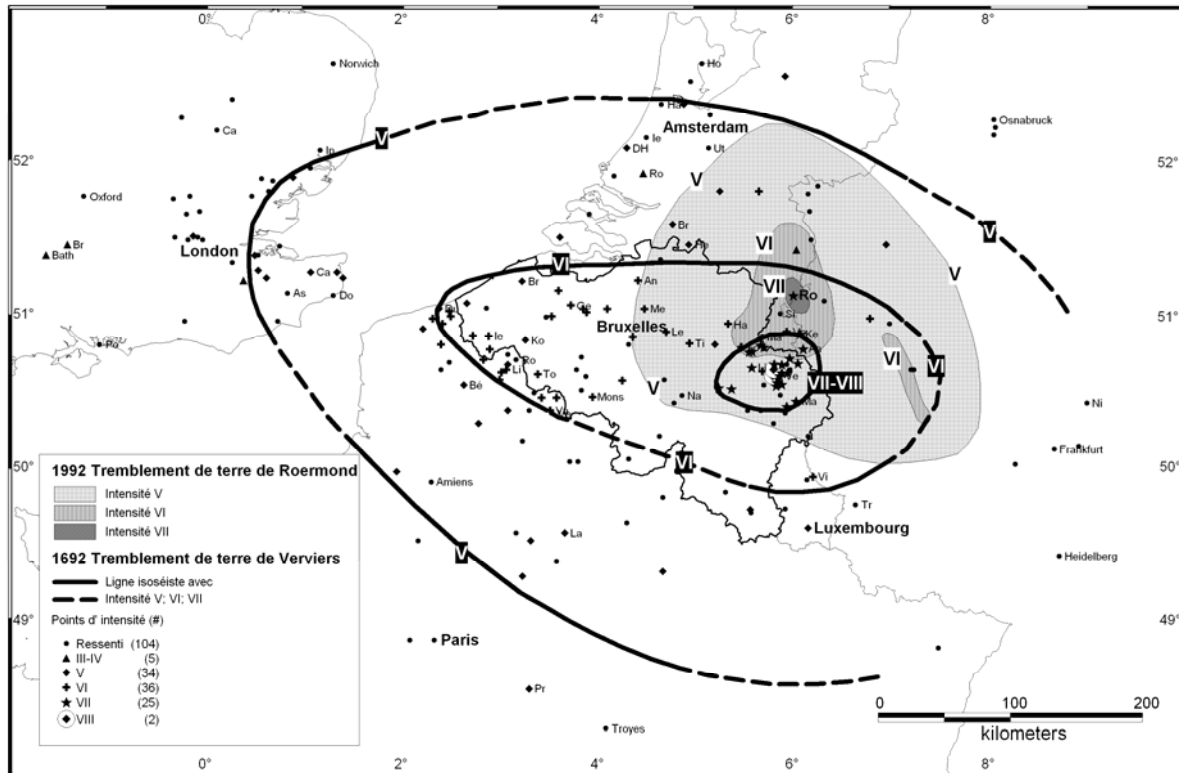


Figure 3 : Comparaison de l'étendue des effets des tremblements de terre du 18 septembre 1692 et du 13 avril 1992.

Tentative de carte macroséismique pour le séisme de Verviers en 1692, indiquant la limite des régions où des intensités supérieures à V, VI et VII-VIII ont été dépassées. Chaque point sur la carte indique une localité pour laquelle nous disposons de témoignages contemporains du séisme. Les effets du séisme de 1692 (magnitude 6 1/4) ont été ressentis sur une aire beaucoup plus importante que pour le séisme de Roermond en 1992 (magnitude 5.4).

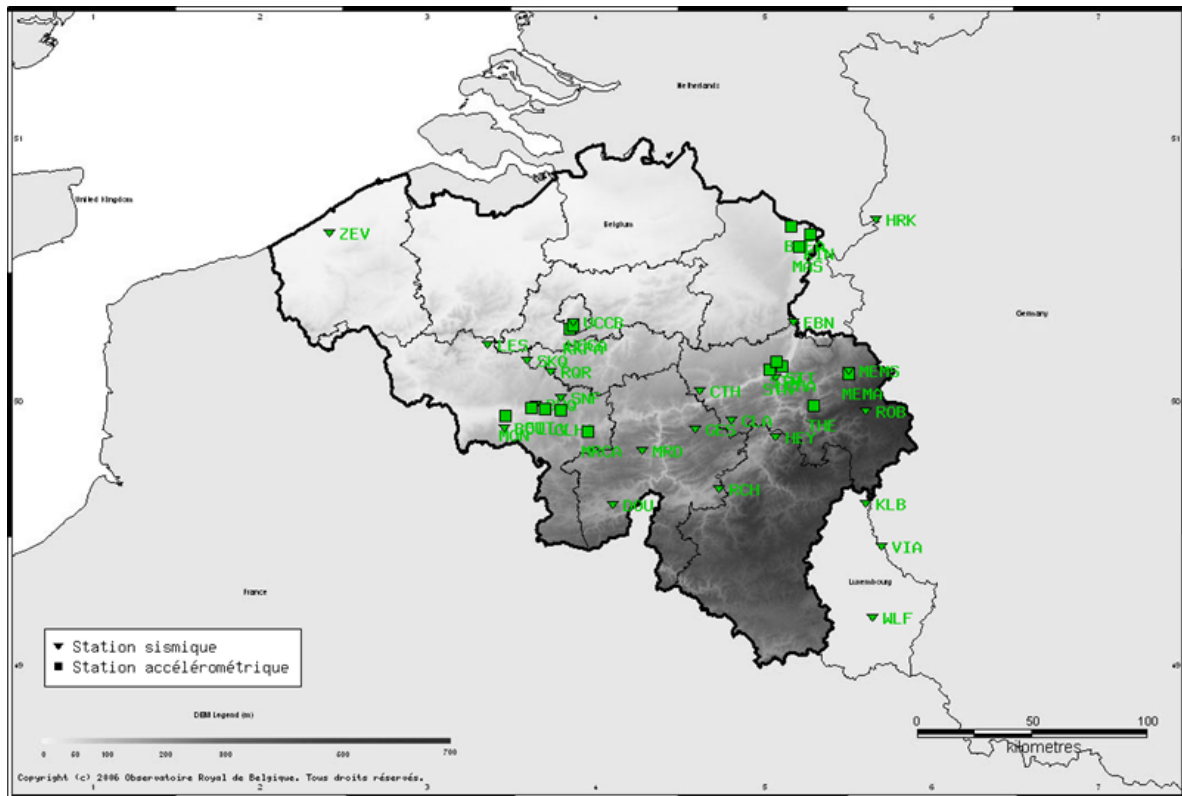
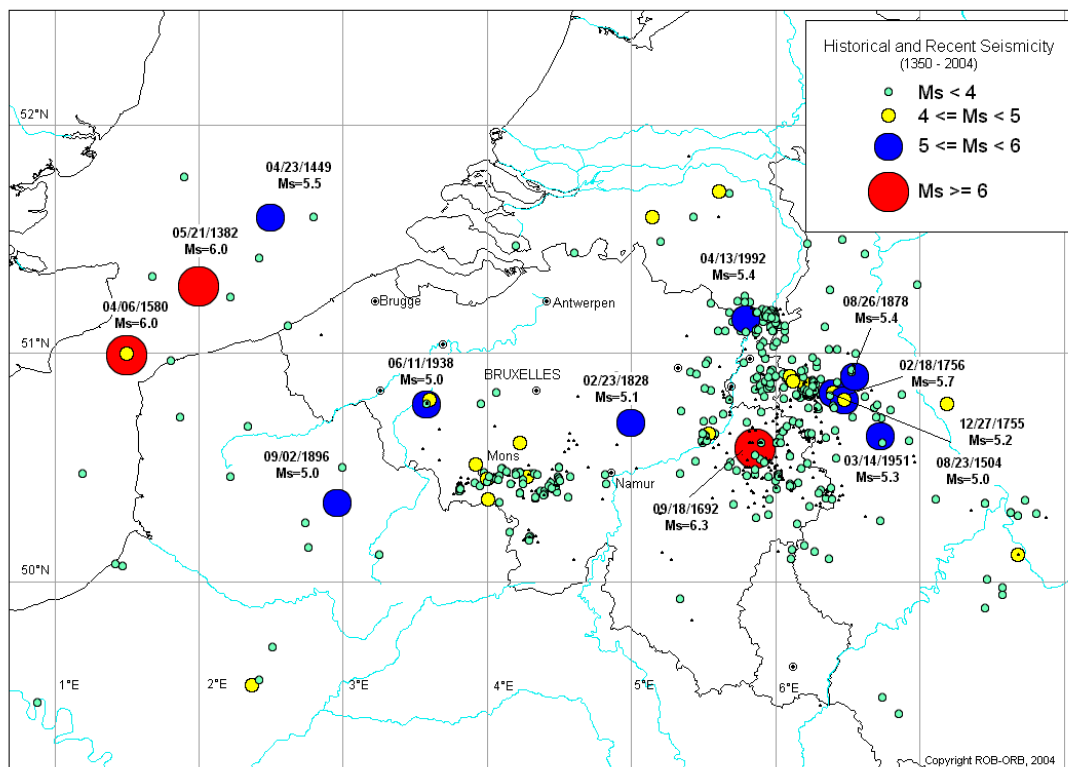


Figure 4. Les réseaux sismique et accélérométrique



Sismicité historique (dès 1350) et instrumentale (1985-..)

Figure 5. Activité sismique en Belgique et dans les régions voisines depuis l'an 1300 (catalogue de l'Observatoire Royal de Belgique).

Période de temps futur T fixée

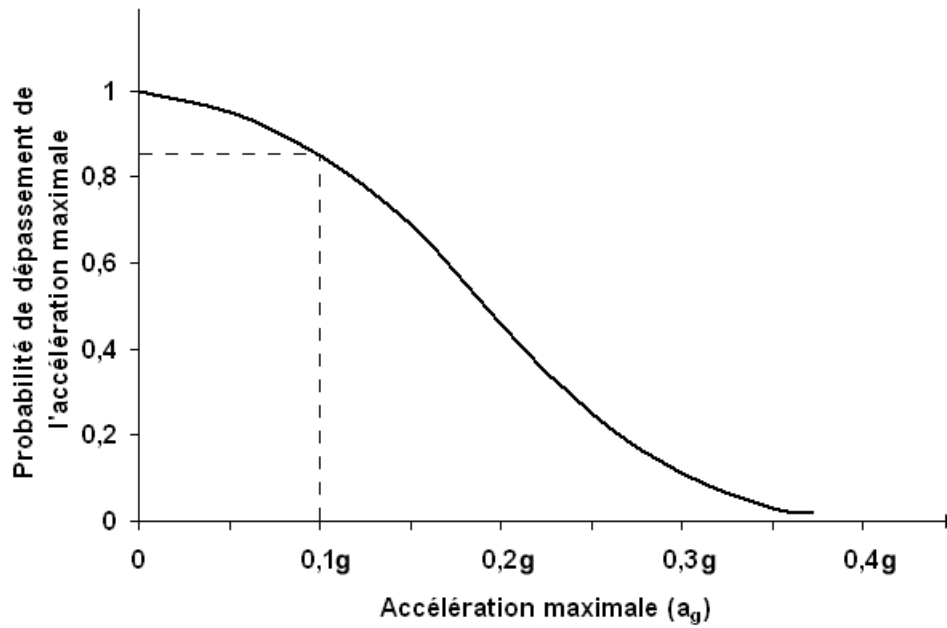


Figure 6. Aléa sismique en un site – représentation pour une période de temps fixée

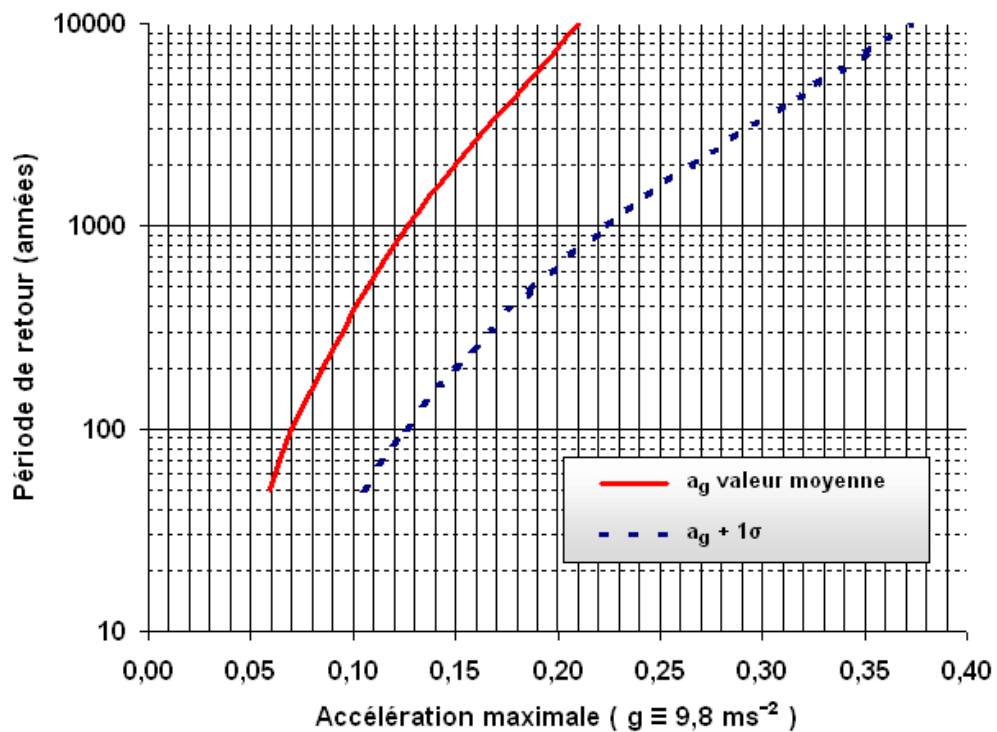


Figure 7. Aléa sismique à Liège exprimé en fonction de la période de retour

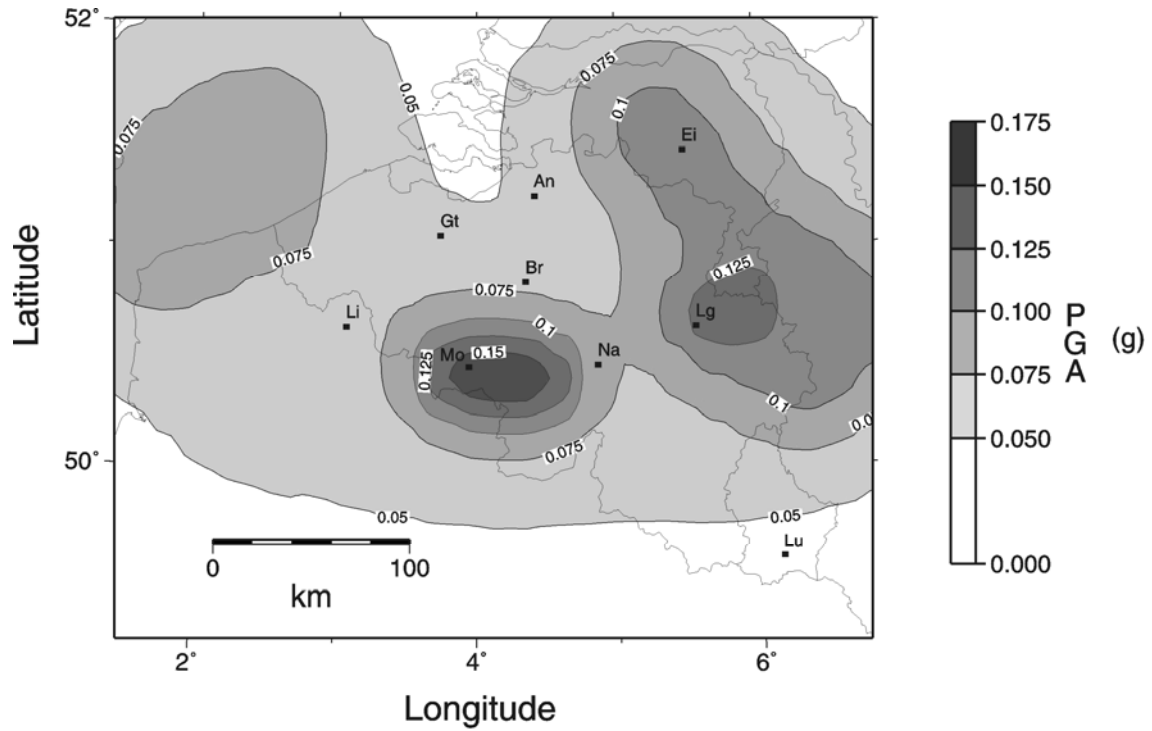


Figure 8. Aléa sismique en Belgique pour une période de retour de 475 ans (d'après [7]).

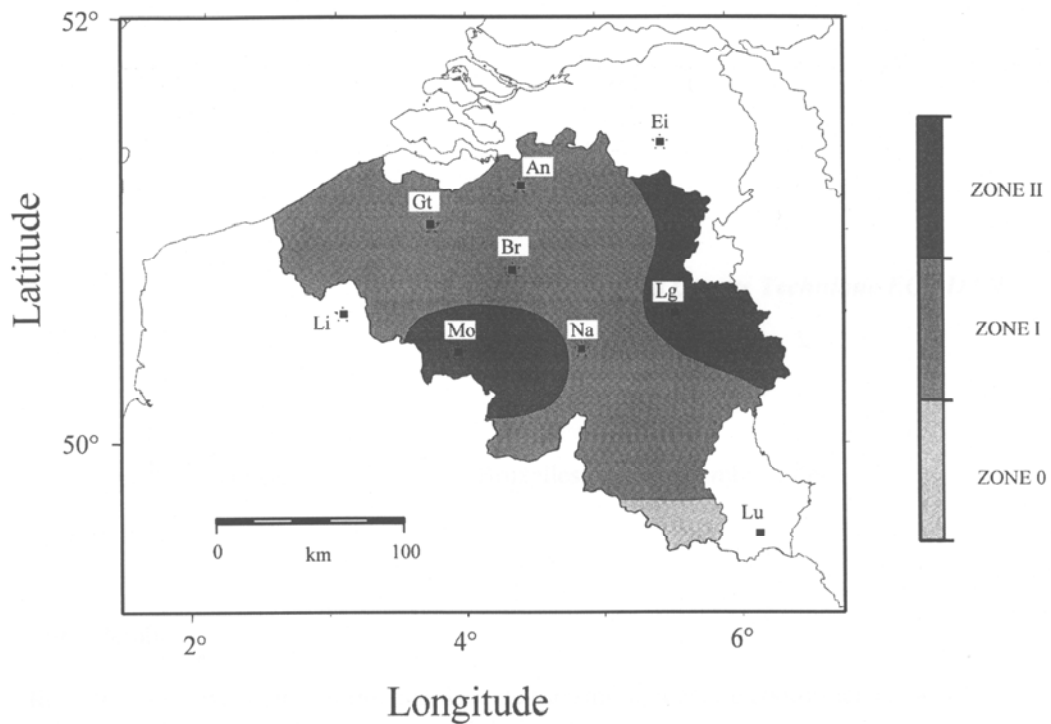


Figure 9. Zonage sismique de la Belgique pour l'Eurocode 8 (basé sur la carte d'aléa sismique au rocher). ZONE II – l'accélération maximale à prendre en compte sur le bedrock est de 0.1 g ; ZONE I – l'accélération maximale à prendre en compte est de 0.05 g ; ZONE 0 – pas de niveau d'accélération à considérer.

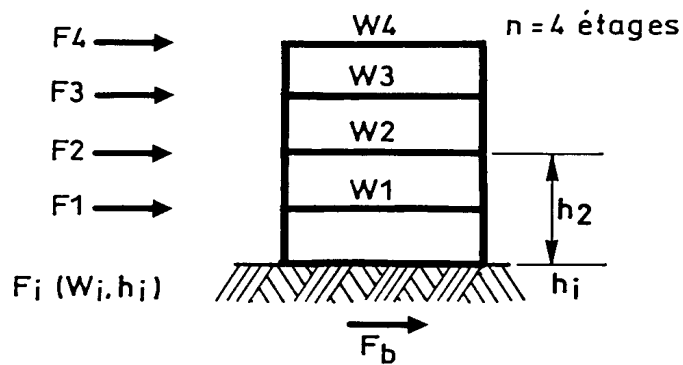


Figure 10. Effet d'un séisme sur un bâtiment.

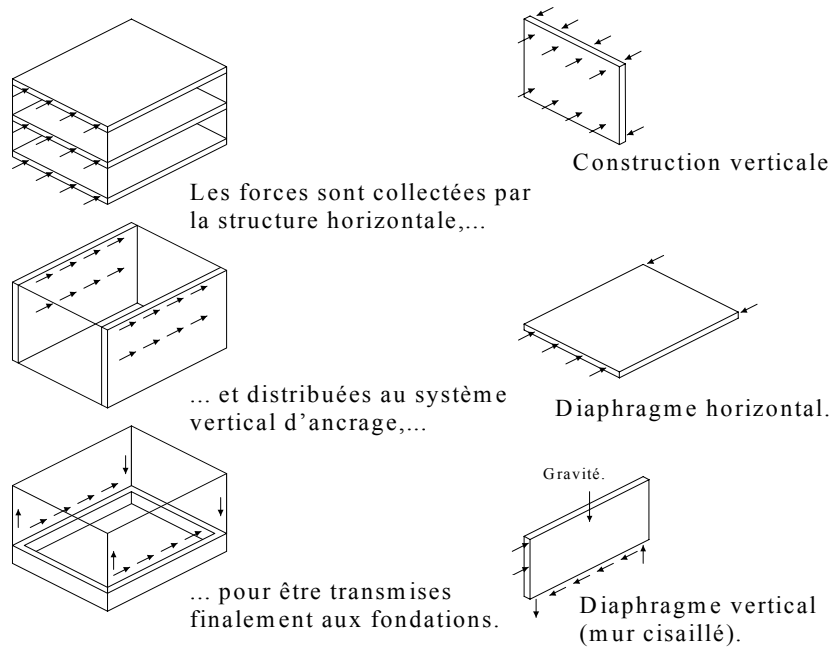


Figure 11. Schéma général de fonctionnement en « boîte » pour la reprise des actions horizontales de séisme ou de vent (d'après [16]).

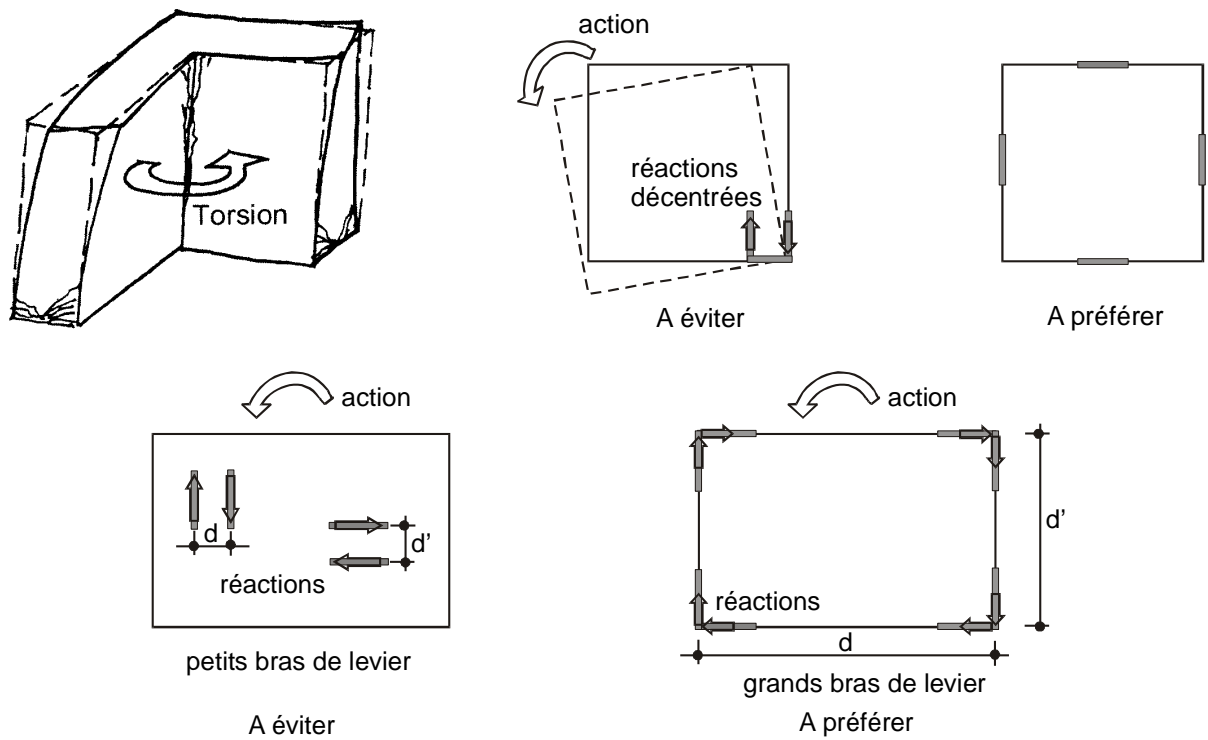


Figure 12. a. Influence néfaste de la forme irrégulière en plan du bâtiment ou de sa structure résistante : effets de torsion, concentration de déformations dans les angles rentrants. b. Une grande distance entre les éléments parallèles favorise la résistance de la structure à la torsion grâce à un bras de levier important dans le plan horizontal (d'après [17]).

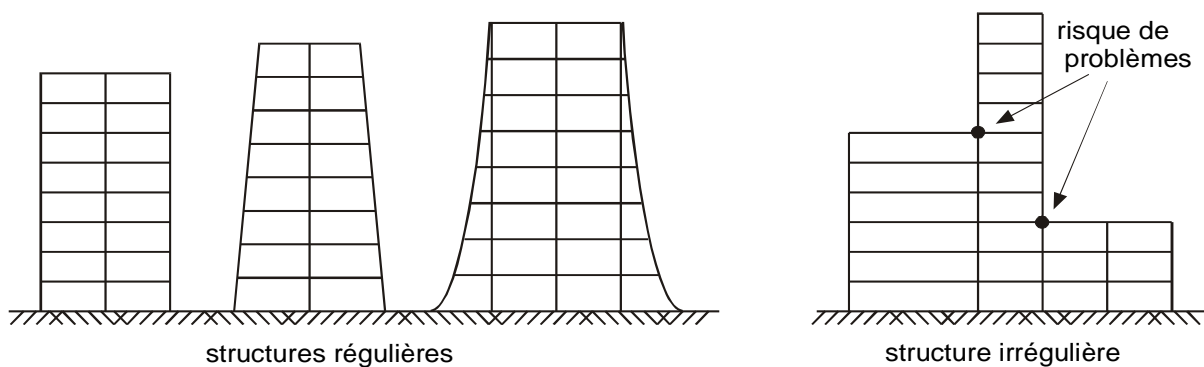


Figure 13. Régularité en élévation (d'après [17]).

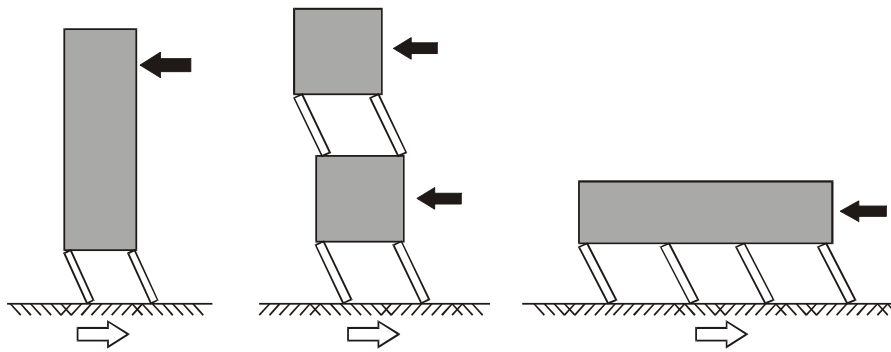


Figure 14. Bâtiments avec niveaux transparents faibles et risque de ruine du bâtiment(d'après [17].)

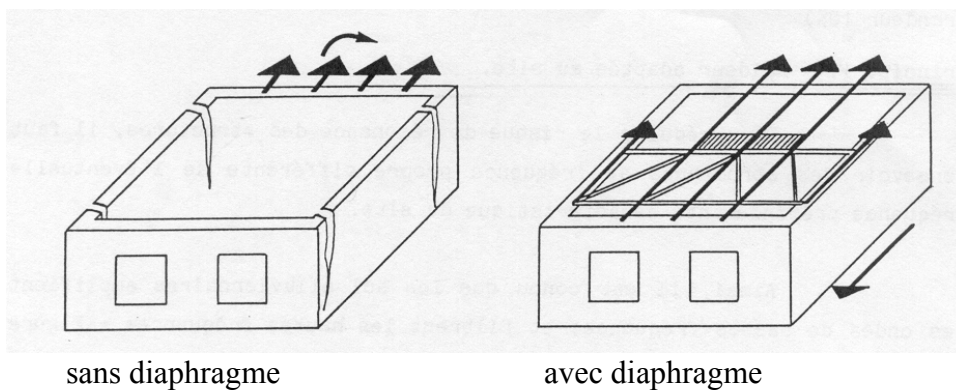


Figure 15. Effet d'un séisme sur une construction en maçonnerie sans diaphragme (à g.) et avec diaphragme (à dr.).

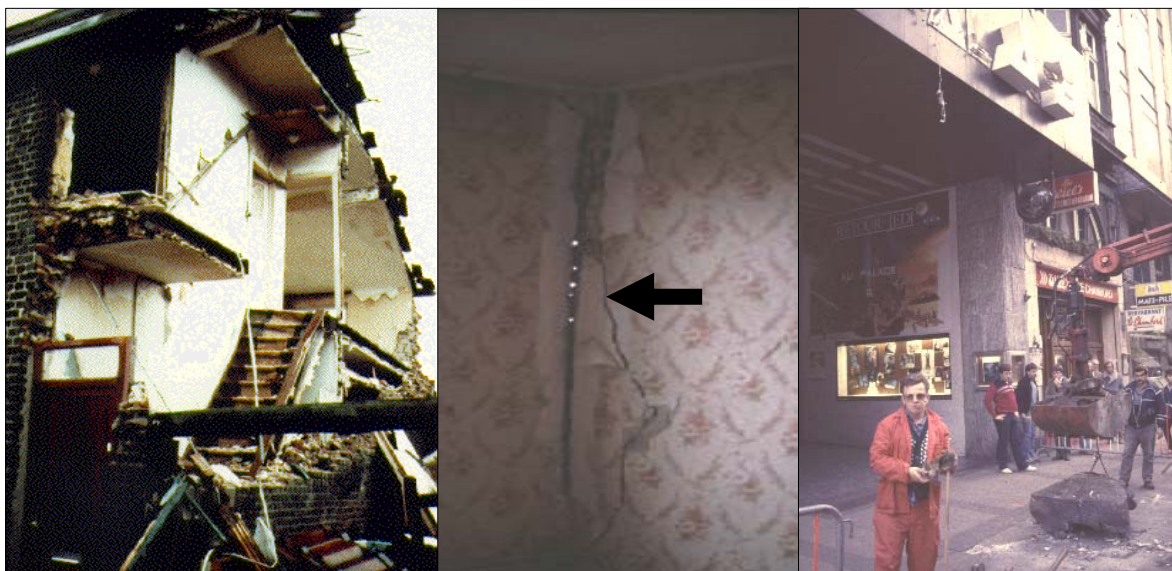


Figure 16. Liège, 1983. Effet de la faiblesse des diaphragmes (fissuration à l'angle des murs) ou de la faiblesse de leur connections aux murs (effondrement de façade). Chute d'un parement en pierre.

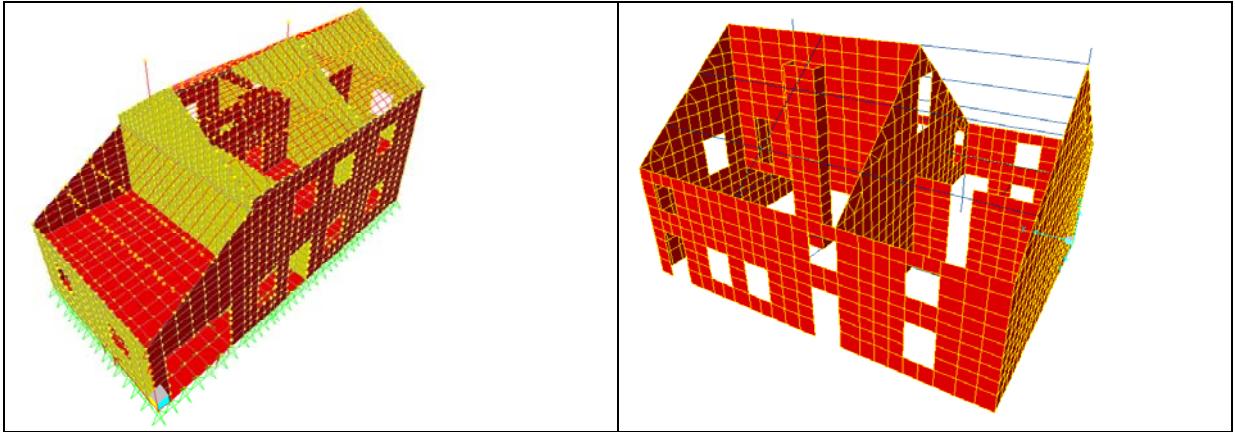


Figure 17. Maillages de 2 maisons [9].

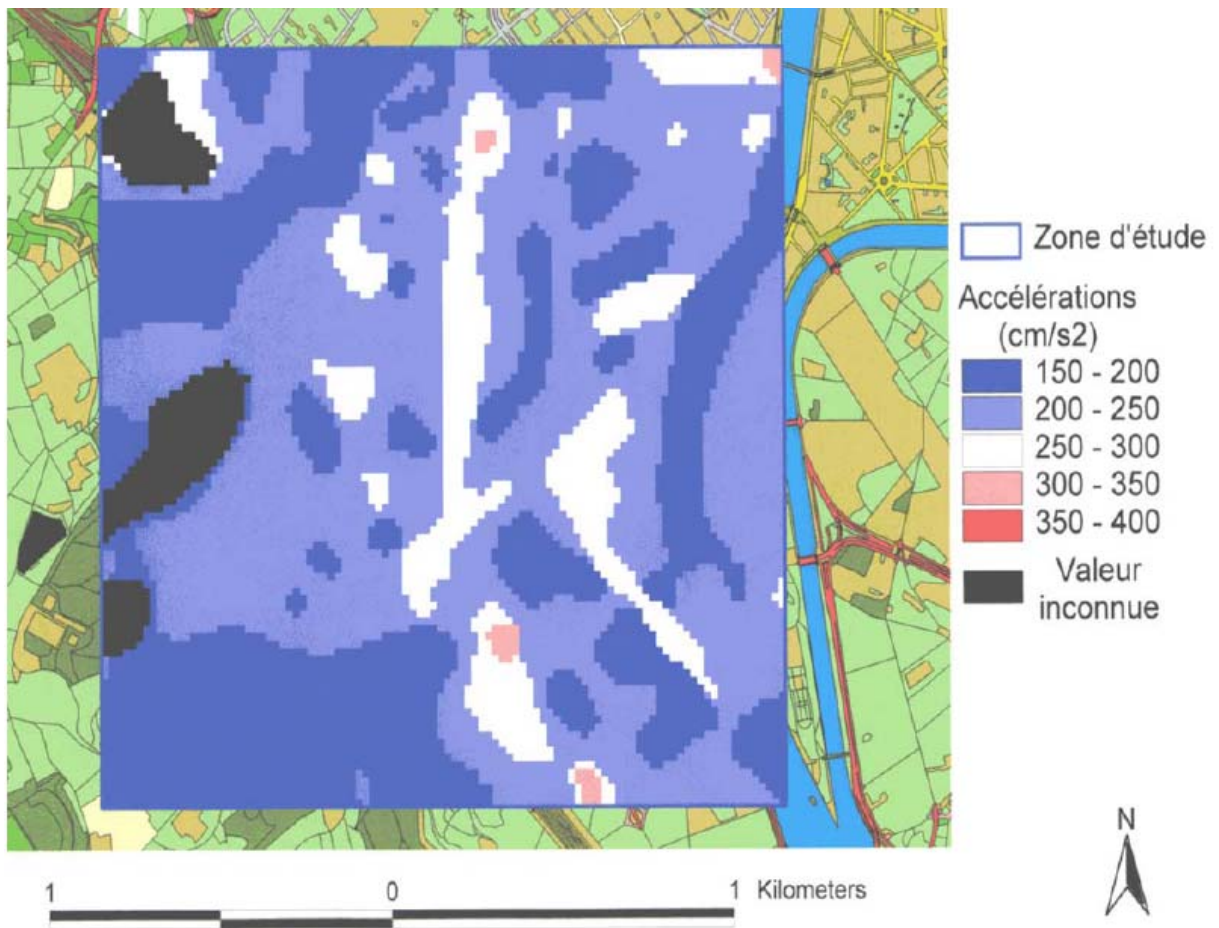


Figure 18. Carte des accélérations maximales pour un séisme de magnitude $M_s = 6,5$ à 40 km de Liège [13].

Damage factor, d

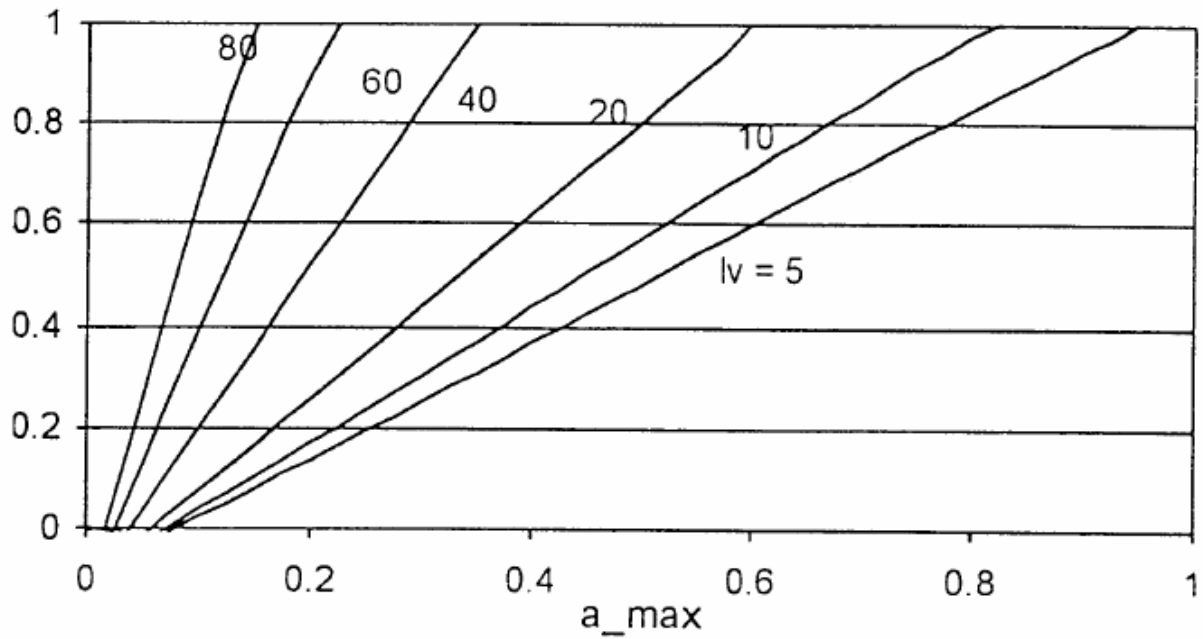


Figure 19. Diagramme Vulnérabilité (indice I_v) - Dommage (d) - Accélération a_g (a_{max} , unité : g) en base, pour les constructions en maçonnerie et les bâtiments en béton armé non parasismiques [13].

Carte 6 - Dommage D pour un seisme lointain de période de retour 475 ans.

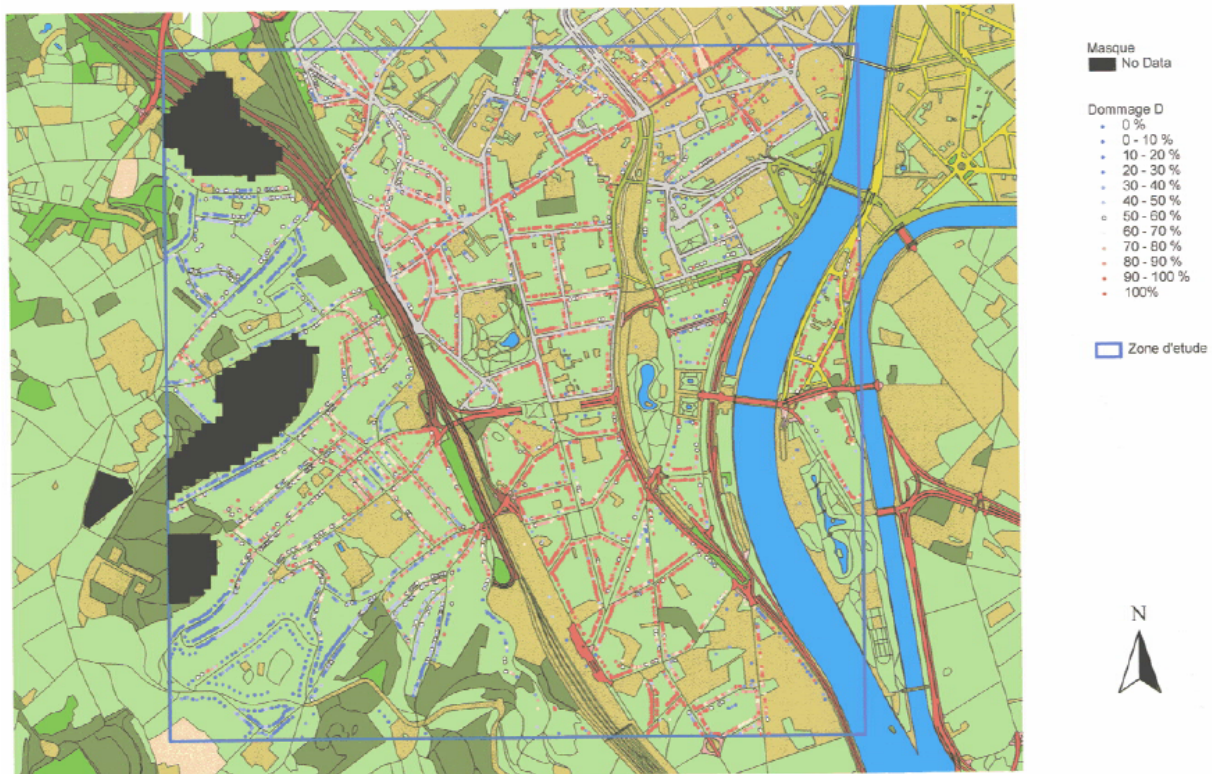


Figure 20. Risque sismique en terme de dommage d pour chaque bâtiment de la zone d'étude[13].