



Les tremblements de terre
dans les régions « stables » d'Europe :

une bombe à retardement ?

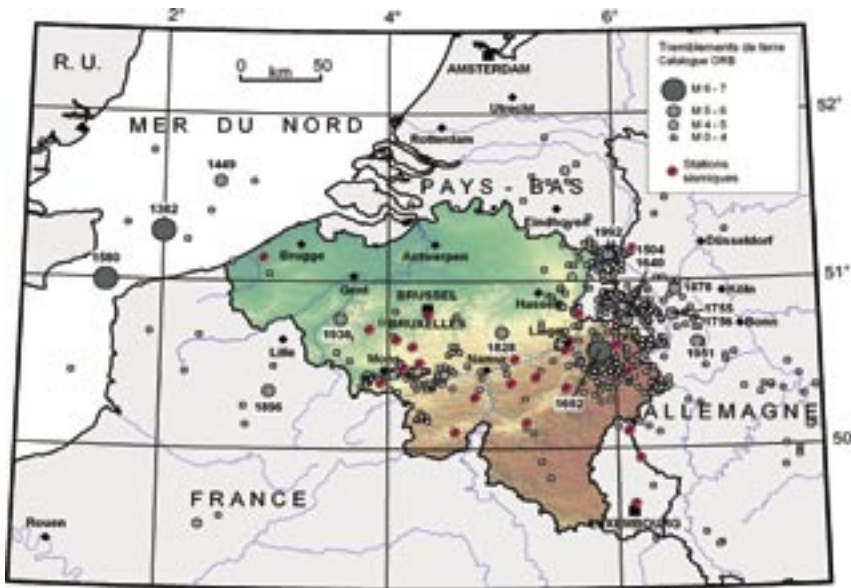
Plus de 90% de l'activité sismique dans le monde est localisée à la limite des grandes plaques lithosphériques couvrant la surface de la Terre. Néanmoins, certaines régions situées à l'intérieur des continents à relativement grande distance de ces limites de plaque sont le siège d'une activité sismique non négligeable. Dans ces régions, souvent considérées comme stables du point de vue tectonique, il n'existe généralement aucune mesure de prévention adaptée à l'importance des tremblements de terre potentiels qui pourraient s'y produire. Avec pour conséquence des situations dramatiques lorsque l'événement majeur se produit. L'évaluation de la grandeur de ces grands événements « rares », de leur localisation possible

et de leur période de retour est un véritable défi pour les scientifiques. Durant ces dernières années, les scientifiques de la section de sismologie de l'Observatoire royal de Belgique (ORB) ont développé des méthodologies et des outils pour fournir des éléments de réponse à ces questions en Europe du nord-ouest et dans d'autres régions intraplaques du monde.

© J.Wouters, *Le Soir*, 1983

L'activité sismique actuelle – le réseau de surveillance sismique belge

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



D'autres parties de constructions, tels des frontons en pierre de taille ou des couvertures de cheminées, sont également tombés. La chute de tous ces objets a causé des dégâts nombreux aux toitures et aux véhicules stationnés au pied des immeubles (voir p. 23). Cela aurait pu aussi être la cause de nombreux décès si le tremblement de terre s'était produit pendant la journée.

Le séisme de Liège a fait comprendre aux autorités l'importance d'une surveillance adéquate de l'activité sismique de nos régions. Le réseau de surveillance sismique, mis en place progressivement par l'ORB, comporte actuellement 40 stations sismiques qui mesurent de manière continue les mouvements du sol. Le but d'un tel réseau est d'enregistrer en permanence l'activité sismique dans nos régions, qui consiste surtout en de nombreux tremblements de terre de faible magnitude, non ressentis, qui doivent pouvoir être détectés et localisés avec précision. Ce sont les données de base pour l'étude scientifique des tremblements de terre dans nos régions. L'analyse des signaux sismiques permet d'identifier et de mesurer ceux qui ont été provoqués par des tremblements de terre. Elle permet de fournir rapidement toutes les informations concernant les événements sismiques ressentis dans nos régions et contribue ainsi à permettre une mise en œuvre rapide des secours aux endroits adéquats lors de futurs séismes destructeurs. Il est à noter que d'autres événements naturels (chutes de météorites, microséisme d'origine météorologique,...) ou provoqués par l'activité humaine (tirs en carrière, séismes induits, explosions de canalisation,...) peuvent être enregistrés par ces équipements.

Les grands séismes du passé dans la topographie et l'enregistrement géologique

La plupart des séismes connus de magnitude supérieure à 5.0 dans nos régions se sont généralement produits en

Activité sismique en Belgique et dans les régions voisines depuis l'an 1300 (catalogue de l'Observatoire royal de Belgique). Les séismes dont la magnitude a été mesurée ou évaluée supérieure à 5.0 ont été indiqués sur la carte avec leur année d'occurrence.

par une activité sismique faible par comparaison à la sismicité globale. Pourtant, presque chaque année, des tremblements de terre sont ressentis par la population et régulièrement, des séismes provoquent 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.

Lors du séisme à Liège en 1983, plus de 16.000 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 ($M = 4.7$) 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. Les dégâts les plus visibles ont été la chute d'innombrables cheminées.

Les tremblements de terre du passé

Étant donné la jeunesse relative des réseaux sismique modernes, la grande partie de l'information disponible au sujet de l'activité sismique provient des archives historiques. Malheureusement, la plupart des catalogues européens publiés avant 1980 étaient des compilations obtenues sans critique des sources historiques. L'implication d'historiens professionnels dans ces recherches a conduit à un changement majeur dans la qualité et la fiabilité de la connaissance de l'activité sismique dans certaines régions d'Europe. Ainsi, les travaux menés à l'Observatoire royal de Belgique ont permis de se faire une idée plus précise de l'activité sismique de nos régions. La figure ci-dessus indique la localisation de l'épicentre des tremblements de terre répertoriés dans nos régions depuis le XIV^e siècle. Des recherches spécifiques relatives aux tremblements

de terre les plus importants ont été menées afin de pouvoir mieux en évaluer la magnitude et l'impact. Par exemple, les nombreux documents, contemporains du tremblement de terre du 18 septembre 1692, attestent de son importance (figure ci-contre) et ont permis de localiser son épicentre dans le nord de l'Ardenne belge, où les destructions ont été très importantes. La carte des dégâts montre que les destructions ont été très étendues, du Kent en Angleterre à la Rhénanie et à la Champagne centrale. Ce tremblement de terre est un des plus importants ressentis en Angleterre, bien que ce pays se situe à la périphérie de la zone de perceptibilité du séisme. Sa magnitude a été estimée entre 6.0 et 6.5 par comparaison avec la zone de perceptibilité et l'aire de la surface de la région affectée par des dégâts lors de tremblements de terre récents. Des

des endroits différents. Il y a une probabilité importante que le prochain événement d'une certaine ampleur se produise en un lieu considéré jusqu'à présent comme peu actif du point de vue sismique. Cette remarque est une illustration du fait que l'activité sismique connue n'est pas représentative de l'activité sismique à long terme et est donc insuffisante pour nous apporter une information complète sur la localisation potentielle des futurs grands tremblements de terre. L'étude de l'activité sismique à long terme d'une région requiert une perspective temporelle la plus longue possible. Dans cet ordre d'idée, il est important de se rappeler qu'un tremblement de terre est un événement rapide et catastrophique le long d'une faille ou dans une région qui est l'aboutissement d'un processus géologique à long terme. Comme la rupture associée à un grand tremblement de terre peut atteindre la surface du sol, elle laisse généralement, mais pas toujours, des indices de son occurrence dans l'enregistrement géologique et la morphologie du paysage. De même, l'amplitude et la durée des mouvements forts du sol durant un tremblement de terre peut engendrer des déformations des couches de sol peu consolidée (phénomènes de liquéfaction, glissements de terrains, ...). Ainsi, les géologues peuvent retrouver leur trace et les interpréter. C'est l'objectif des disciplines scientifiques que sont la tectonique active et la paléosismologie.

La plupart des observations quantitatives sur les failles actives et leur relation avec l'activité sismique proviennent des régions du globe où l'activité sismique est importante. Dans ces régions, les grands tremblements de terre le long des failles actives se succèdent avec des périodes de retour moyennes de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines d'années et des taux moyens de déformation variant entre quelques mm/an et quelques cm/an. Ils façonnent ainsi la morphologie du paysage en édifiant à l'échelle des temps géologiques des structures de grande ampleur. Dans les régions intra-

plaques comme le nord-ouest de l'Europe, les grands tremblements de terre sont rares et leur succession n'est pas nécessairement marquée dans le paysage parce que les taux d'érosion et de déposition peuvent dépasser les faibles taux de déformation. Néanmoins, dans la région de Bree dans le Limbourg belge, un escarpement de faille (faille du Feldbiss) orienté nord-ouest – sud-est sépare le plateau de Campine du graben de la Roer (p. 26). Cet escarpement relativement linéaire est long de 10 Km avec un relief vertical de 15 à 20 mètres. Il est reconnu depuis une centaine d'année par les géologues belges comme étant l'expression morphologique d'une zone de failles dont l'activité est assez récente puisque les sédiments de la Meuse et du Rhin déposés il y a entre 350.000 et 700.000 y sont déplacés verticalement de 35 à 40 mètres. Cette faille fait partie du grand réseau de failles qui limitent le graben de la Roer sur des longueurs cumulées d'environ 300 Km. Jusqu'il y a peu, bien que l'activité sismique dans le graben de la Roer ait été associée avec ces failles, les escarpements dans la morphologie étaient soit considérés comme résultant de mouvements continus a-sismiques, soit simplement comme dus à l'action d'une érosion différentielle de part et d'autre de la faille. L'occurrence de grands tremblements de terre et les mouvements co-séismiques permanents à la surface du sol qui sont leur conséquence étaient considérés comme tout à fait improbables. En 1996, l'Observatoire royal de Belgique a entrepris une étude détaillée de l'escarpement de Bree pour rechercher des indices de grands tremblements de terre qui auraient pu s'y être produits dans un passé géologique récent. Ces recherches ont été financées par les projets européens PALEOSIS (1998 – 2000) et SAFE (2001 – 2004) ainsi que par des actions d'impulsion à la recherche scientifique dans les Établissements scientifiques fédéraux de la Politique scientifique fédérale. Elles combinent des études morphologiques de détail sur le terrain, basées sur les données topographiques (modèles numériques de

Comparaison de l'étendue des effets des tremblements de terre du 18 septembre 1692 et du 13 avril 1992. La carte indique la limite des régions où des intensités supérieures à V (forte secousse avec quelques dégâts légers), VI (dégâts légers généralisés) et VII-VIII (dégâts à dégâts importants) ont été dépassées lors de ces deux tremblements de terre. Chaque point sur la carte indique une localité pour laquelle nous disposons de témoignages contemporains du séisme de 1692. La magnitude du séisme de 1692 a été évaluée à 6 ¼ en se basant sur l'extension géographique de ses effets. Ceux-ci ont en effet été observés sur une aire beaucoup plus importante que lors du séisme de Roermond en 1992 dont la magnitude était 5.4.

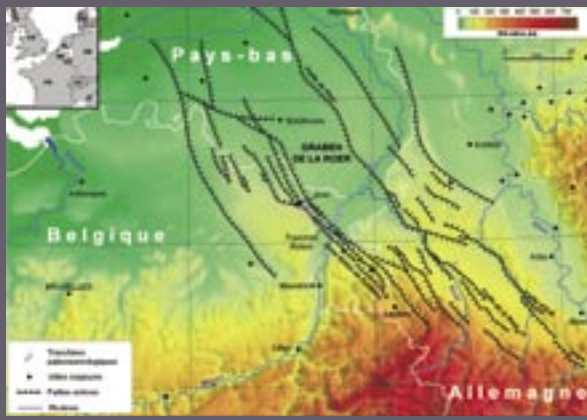
études réalisées en collaboration avec nos collègues anglais et français on montré que deux autres tremblements de terre de même importance se sont produits le 21 mai 1382 dans le sud de la mer du Nord et le 6 avril 1580 dans le Pas-de-Calais.

Les trois tremblements de terre dont nous venons de parler sont beaucoup plus importants que les tremblements de terre modérés, localement destructeurs, que nous avons connus durant le XX^e siècle. Alors que les tremblements de terre de Liège en 1983 et de Roermond en 1992 ont eu un coût économique cumulé estimé à quelques 200 millions d'euros, l'impact d'un séisme de magnitude 6.0 à 6.5 sur une ville comme Cologne a été évalué entre 15 et 100 milliards d'euros par les compagnies européennes de réassurance.



Etude des failles actives dans le Limbourg belge

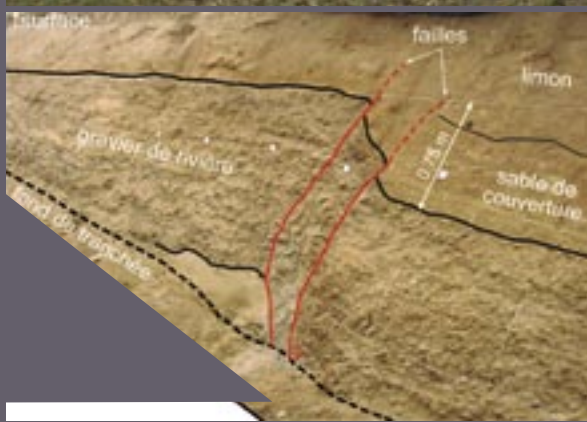
(a) Localisation des failles Quaternaires dans la région du Rhin Inférieur et des tranchées excavées dans le cadre d'études dirigées par l'Observatoire Royal de Belgique ;



(b) L'escarpement de Bree (situé au sud de Bree) a été formé par la succession de grands tremblements de terre durant les 350.000 dernières années ;



(c) Tranchée de Rotem excavée à travers la faille de Geleen, montrant le déplacement des couches géologiques résultant du dernier grand tremblement de terre s'y étant produit il y a un peu plus de 3000 ans.



Quelle est la magnitude de ces grands tremblements de terre ? La magnitude est un chiffre qui permet de classer les événements sismiques en fonction de l'énergie rayonnée sous forme d'ondes sismiques à l'intérieur et à la surface de la Terre. Les travaux des sismologues durant les quarante dernières années ont montré qu'elle est directement reliée aux dimensions de la faille le long de laquelle la rupture s'est propagée et à la grandeur du glissement relatif provoqué par le séisme. Classiquement, la magnitude est déterminée à partir des séismogrammes enregistrés par un certain nombre de stations sismiques. Dans le cas de grands tremblements de terre, étant donné que le mouvement de la faille se répercute jusqu'à la surface de la Terre, la magnitude peut également être déterminée à partir des observations géologiques sur le terrain et (ou) à partir des mesures géodésiques de déformations de la surface du sol, qui permettent l'évaluation de la longueur de faille affectée par la rupture du séisme ainsi que du mouvement associé.

terrain) et les photos aériennes, avec de la prospection géophysique de sub-surface (sismique réflexion, tomographie électrique, radar,...) pour identifier la position de la déformation tectonique la plus récente en relation avec la morphologie ainsi que l'excavation de tranchées à travers la zone de faille quand celle-ci a été correctement identifiée. L'analyse paléosismologique d'une tranchée est basée sur l'observation et la mesure des éventuels déplacements et (ou) déformations des couches sédimentaires liées à l'occurrence d'un grand tremblement de terre. La datation des dépôts géologiques successifs fournit en outre une fourchette d'âges pour ces différents événements par la considération de la datation du niveau le plus jeune affecté par la déformation liée à chacun des événements et celle du niveau le plus ancien non affecté.

L'étude des cinq tranchées excavées à travers l'escarpement de Bree indique l'occurrence d'au moins cinq grands tremblements de terre durant les 100.000 dernières années. Le plus récent s'est vraisemblablement produit il y a un peu plus de 3.000 ans, et le déplacement vertical qu'il a provoqué est d'environ 0,55 mètre. Un petit escarpement, associé au déplacement permanent produit par cet événement, est visible dans le paysage en de nombreux endroits le long de l'escarpement de Bree. Cette dénivellation dans la topographie correspond parfaitement au déplacement le plus récent observé dans les différentes tranchées. L'avant-dernier grand tremblement de terre a provoqué des déplacements semblables au séisme le plus récent et s'est produit il y a entre 9.600 et 13.600 ans. L'antépénultième événement, avec un déplacement vertical moyen estimé à 1,2 m entre le Plateau de Campine et le graben de la Roer, semble avoir été plus important. Sa date d'occurrence est beaucoup plus imprécise. On peut le dater de 20.000 et 46.000 ans.

Dans le cas des paléo-séismes le long de l'escarpement de Bree, le mouvement vertical relatif entre le Plateau de Campine et le graben de la Roer, mesuré dans les tranchées suggère une magnitude de $6,5 \pm 0,3$ pour les deux tremblements de terre les plus récents et $6,7 \pm 0,3$ pour l'antépénultième événement. La longueur de la section de faille sur laquelle la rupture s'est propagée est aussi une grandeur fondamentale pour en estimer la magnitude. Si on considère une longueur de 10 Km, correspondant aux observations de l'escarpement frontal, la magnitude est estimée à $6,3 \pm 0,3$. Cette valeur est un minimum parce qu'il n'est pas certain que la rupture de ces tremblements de terre se limite à l'escarpement de faille séparant le Plateau de Campine du Graben de la Roer. Nos études actuelles visent à étudier les portions de failles adjacentes à l'escarpement de Bree pour déterminer les relations mécaniques existant entre-elles et ainsi mieux évaluer la longueur des ruptures.

Etude des failles responsables des grands séismes de 1928 dans le sud de la Bulgarie

Nous avons développé des outils performants qui fournissent un moyen unique d'aborder l'étude de l'activité sismique à long terme de régions faiblement actives. Dans le nord-ouest de l'Europe, aucune rupture en surface visible n'a pu être reliée à un tremblement de terre historique connu. Le seul événement pour lequel une telle relation paraît vraisemblable est le séisme du 18 septembre 1692. La topographie de la région épiscopale de cet événement, le nord de l'Ardenne belge, rend cependant difficile cette recherche. Un problème fondamental dans nos recherches est donc de présenter des arguments scientifiques valables montrant que les déformations observées en surface dans le graben de la Roer sont bien d'origine sismique.

Il était donc important du point de vue méthodologique de pouvoir utiliser également ces méthodes dans des régions à « faible activité » où de grands tremblements de terre se sont produits récemment. Pour cette raison, nous avons entrepris depuis 2000, en collaboration avec l'Académie des sciences de Bulgarie, une étude des failles affectées par les deux grands tremblements de terre des 14 et 18 avril 1928 ($M = 6.8$ et 7.0 respectivement) dans le sud de la Bulgarie. Ces séismes ont provoqué des ruptures en surface sur une longueur cumulée d'environ 80 Km, avec des déplacements maxima visibles d'environ 0.5 mètre pour le premier et de 3 mètres pour le second. L'évaluation de la période de retour de tels tremblements de terre est très importante pour cette région en développement économique. Cette étude fructueuse est supportée financièrement par un accord bilatéral entre la Belgique et la Bulgarie.

La prévention des tremblements de terre dans nos régions

Les phénomènes naturels sont généralement d'autant plus catastrophiques qu'ils sont rares et inattendus. Leur rareté conduit généralement à un manque total de prévention vis-à-vis des conséquences de l'événement. Le méga-séisme de Sumatra - Andaman du 26 décembre 2004, dont une des conséquences a été le tsunami qui a dramatiquement frappé toutes les zones côtières de l'Océan indien, est l'exemple typique de cette non-préparation. D'autres phénomènes naturels, bien que prévisibles à court terme, deviennent également des catastrophes par manque de prévoyance dans de très nombreuses régions du monde et pas seulement dans les plus pauvres. Les effets de l'ouragan Katrina en septembre 2005 sur les côtes de Louisiane sont exemplaires à cet égard. Pour ces deux exemples, les scientifiques avaient prévu l'occurrence de tels événements catastrophiques pour les années ou décennies à venir. Malheureusement, ils n'ont pas été entendus.

Les risques sismiques sont généralement sous-estimés en Belgique. Les études de risque montrent que le risque de dégâts provoqués par les tremblements de terre est, pour un bâtiment donné en Belgique, 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, pour les niveaux de risques considérés pour les constructions civiles normales, le risque par construction est identique. Il n'y a donc aucune 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. La Commission européenne a édicté un code de constructions parasismiques (l'Eurocode-8) pour lequel chaque pays doit définir un document d'application. Ce travail a déjà été réalisé en Belgique, sous la direction de l'Université de Liège, et nous disposons donc d'un outil de prévention pour les nouvelles constructions. Ce n'est malheureusement pas le cas pour le bâti existant.

Nos recherches montrent également que, dans la région située entre la vallée du Rhin et le sud de la mer du Nord, de grands tremblements de terre dont la magnitude a pu atteindre 7.0 se sont produits dans le passé. Même s'ils sont rares, en moyenne un séisme de magnitude supérieure à 6.0 par 230 ans, ils se reproduiront. Ils 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. C'est donc une problématique à considérer sérieusement et il serait opportun, sans catastrophisme, de réaliser des études pour caractériser l'impact réel d'un tel événement et de planifier l'action d'urgence et la prévention adaptées à ce type d'événement majeur. La section de sismologie de l'Observatoire royal de Belgique est bien consciente de la problématique et a orienté des programmes de recherche dans ce domaine en collaboration avec l'Université de Liège, la Faculté polytechnique à Mons et l'Institut supérieur de planification d'urgence du SPF « Intérieur ».

Thierry Camelbeeck et Kris Vanneste



La section de sismologie de l'Observatoire royal de Belgique :
www.astro.oma.be/SEISMO/index.html

En 1996, l'Observatoire royal de Belgique a entrepris une étude détaillée de l'escarpement de Bree pour rechercher des indices de grands tremblements de terre qui auraient pu s'y être produits dans un passé géologique récent.