

TRENTE ANS DE SURVEILLANCE SISMIQUE EN BELGIQUE

Thomas Lecocq, Thierry Camelbeeck, Giovanni Rapagnani, Baudouin Bukasa, Stefaan Castelein, Fabienne Collin, Marc Hendrickx, Henri Martin, Leslie Vandercoilden, Michel Van Camp et Kris Vanneste

Service scientifique « sismologie-gravimétrie » de l'Observatoire Royal de Belgique

Introduction

A l'époque du tremblement de terre de Liège du 8 novembre 1983, le réseau sismique belge était composé de quatre stations sises à Uccle, Dourbes, Membach et Walferdange (Grand-Duché de Luxembourg), dont l'enregistrement se faisait uniquement sur papier (Figure 1). Chaque mois, une personne de l'Observatoire devait se déplacer pour collecter les rouleaux de papier à Membach et nos collègues d'autres institutions, travaillant à Dourbes et à Walferdange, envoyaient chaque jour à Uccle les enregistrements par voie postale. La station d'Uccle permettait d'avoir une visualisation en temps réel lors de tremblements de terre dans nos régions ou ailleurs dans le monde, mais sa sensibilité était limitée et elle seule ne permettait pas la localisation de ces événements. Il fallait pour cela récupérer les sismogrammes des trois autres stations. La magnitude fournie par l'Observatoire royal était celle calculée par le Centre Sismologique Euro-méditerranéen, créé dans les années 70, parce qu'aucune méthode n'avait été développée pour la détermination de la magnitude à partir des enregistrements des stations belges. Lorsqu'un tremblement de terre était ressenti en Belgique, le service sismologique était averti de sa localisation probable par des appels de particuliers, de médias ou d'autorités locales. Ceci explique pourquoi le ma-

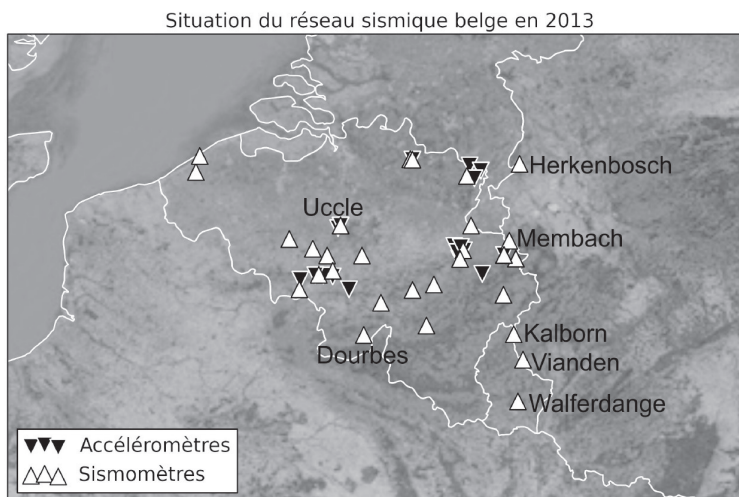


Figure 1 : Les réseaux de surveillance sismique et accélérométrique en Belgique

tin du tremblement de terre de Liège, l'Observatoire royal n'a pu fournir d'information fiable sur l'événement à partir de ses propres enregistrements et pourquoi son directeur a dû envoyer un technicien pour rechercher les enregistrements de l'événement à Dourbes, à Membach et à Walferdange. Ce sont les centres sismologiques étrangers qui ont pallié la pauvreté des moyens belges pour fournir les données scientifiques du tremblement de terre. Cette constatation a poussé le gouvernement de l'époque à allouer un budget en vue de moderniser le réseau sismique belge. En ce sens, la date du tremblement de terre de Liège est particulière parce qu'elle correspond à un moment important dans l'histoire de la sismologie en Belgique¹.

L'évolution continue du réseau de surveillance sismique belge de-

puis 1983 et des développements techniques essentiels ont conduit ces dernières années à la mise en œuvre d'un système d'alerte sismique efficace tout en fournissant un apport énorme pour l'étude de l'activité sismique dans nos régions et de ses relations avec les structures géologiques.

Le réseau de surveillance sismique depuis 1985

Les premières stations sismiques numériques ont été installées en mars 1985. A cette époque, il fallait les visiter tous les quinze jours pour collecter les bandes magnétiques contenant les signaux des événements qui avaient déclenché le système. Pour remédier à cet inconvénient, le Service de sismologie a décidé de développer ses propres systèmes d'acquisition sismique sur PC. Ces développements, réalisés par feu notre

¹ L'historique des stations sismiques belges avant 1983 a fait l'objet d'un article par Van Camp et Camelbeeck dans *Ciel et Terre*, 120 (6), en 2004

collègue Marc Snissaert trop tôt disparu, ont été parmi les premiers à se révéler fructueux en Europe. Outre des coûts réduits, notre système avait sur les stations sismiques fournies par des sociétés privées l'avantage de la maîtrise de tous les éléments permettant des réparations et des modifications rapides, ce qui a aussi facilité l'adaptation à tous les systèmes de télémétrie possibles.

A la date du 1^{er} septembre 1989, 15 stations étaient opérationnelles, dont 6 télémétrées vers Uccle. La télémétrie était analogique et utilisait les lignes téléphoniques du Ministère des Travaux Publics. Ces développements du réseau ont permis de mieux surveiller et étudier l'activité sismique dans nos régions et aussi de pouvoir fournir beaucoup plus rapidement des informations sur les tremblements de terre lorsque cela s'imposait. Ainsi, lors du fort tremblement de terre du 13 avril 1992 à 3h20m locale du matin dans la région de Roermond, l'analyse des sismogrammes des stations télémétrées a permis à l'observatoire de fournir aux autorités, au public et aux médias une information fiable sur la localisation et la magnitude de l'événement moins d'une heure après qu'il se fût produit. Dans ce cas bien précis, le séisme était suffisamment fort pour être ressenti sur une grande partie du territoire et par la plupart des membres du personnel du Service de séismologie, réveillés par le tremblement de terre, qui avaient donc pu réagir rapidement. Cependant, pour d'autres séismes plus faibles, en dehors des heures de service, le fonctionnement du réseau ne permettait pas encore d'être averti qu'un tremblement de terre venait de se produire et, en conséquence, de réagir rapi-

dement. Souvent dans ces cas, le service était prévenu par les médias, par des particuliers ou par des services d'urgence qui nous informaient qu'ils avaient ressenti des secousses.

Au fil des années, de nouvelles stations ont été installées afin de couvrir toujours mieux le territoire (Figure 1). La moitié sud du pays est actuellement mieux couverte, car il est plus facile d'y installer des stations dans de bonnes conditions. En effet, pour mesurer les mouvements du sol lors de tremblements de terre de faible magnitude, il est important que le niveau du bruit de fond sismique reste modéré. Une part de ce bruit sismique a une origine naturelle, mais une grande partie est provoquée par l'activité humaine. Une station sismique installée sur le rocher diminue fortement l'influence de l'activité humaine. C'est le cas dans le sud de la Belgique, où la roche est généralement proche de la surface. Dans le nord du pays, une majorité des terrains sont composés de sables tertiaires et quaternaires et le rocher est situé à une grande profondeur, à savoir environ 100 m à Bruxelles, 300 m à Ostende et 800 m près d'Anvers. Dans ces conditions, il est nécessaire de forer un puits pour atteindre la roche dure et y descendre un sismomètre de forage. Cette expérience a été réalisée en différents sites au cours de ces dix dernières années et a permis l'établissement de quelques bonnes stations dans la partie nord du pays. Malheureusement, de nombreux problèmes techniques ont causé des interruptions de fonctionnement assez fréquentes. Le Service travaille encore actuellement à l'amélioration de la fiabilité de ce type d'équipement de manière à rendre ces stations opérationnelles à 100%.

En parallèle a toujours été suivie l'évolution des techniques de transmission des données, maximisant constamment de la sorte le rapport qualité/coût. Jusqu'en 2006, une majorité des stations sismiques étaient soit hors-ligne, soit connectées par ligne RNIS² mais n'envoyaient pas leurs données en continu, vu le coût de ces communications. Depuis 2006, presque toutes les stations sont connectées à Internet par transmission ADSL et leurs données sont devenues disponibles en temps réel. Cette dernière étape dans l'évolution du réseau permet la surveillance continue des plus petits mouvements du sol et constitue la base du système d'alerte sismique installé à l'Observatoire présenté dans la partie 5 ci-après.

Actuellement, le réseau comporte 26 sites de stations et inclut 38 équipements. L'Observatoire royal possède également une station à Herkenbosch aux Pays-Bas, assurant ainsi une meilleure surveillance de la région de Roermond, et gère trois stations au Grand-Duché de Luxembourg à Walferdange, Vianden et Kalborn. Depuis 2010, dans le cadre de projets de recherche plus spécifiques, il a encore été implanté deux sismomètres à la station Princesse Elisabeth en Antarctique ainsi que quatre stations en Indonésie pour la surveillance des volcans Kawah Ijen et Papandayan.

Les flux de données de certains équipements à large bande sont envoyés quasi en temps réel aux centres internationaux ORFEUS (Observatories and Research Facilities for European Seismology) et IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology) et sont donc utilisés par les séismo-

²Réseau Numérique à Intégration de Services, encore appelé ISDN

logues pour étudier les tremblements de terre partout dans le monde.

L'activité sismique dans nos régions de 1985 à 2013

La Figure 2 montre l'épicentre des 1696 tremblements de terre enregistrés dans nos régions depuis l'installation progressive de notre réseau sismique moderne en 1985. La plupart des événements ont leur localisation (épicentre + profondeur du foyer) déterminée à mieux que 2 km.

La Figure 3 indique par gamme de magnitude le nombre de tremblements enregistrés et localisés par le réseau sismique belge depuis 1970. L'implantation du réseau sismique moderne à partir de 1985 est bien mise en évidence sur ce diagramme. Avant cette date, peu de séismes de magnitude inférieure à $M_L=2,0$, dont le nombre est indiqué par le cumul des petites barres blanches et grisées en clair, étaient enregistrés, tandis qu'un accroissement instantané de ce nombre apparaît dès 1985.

À partir de 1985, il existe une variabilité dans le nombre d'événements détectés. Les pics du nombre d'événements en 1987 et 1989-1990 résultent de l'enregistrement de deux séquences sismiques par des réseaux temporaires mis en place à Dour et dans les Hautes-Fagnes. La densification du réseau sismique à proximité des épicentres lors de telles séquences sismiques favorise l'enregistrement de séismes de beaucoup plus faible magnitude et fournit des localisations relatives des événements avec une précision de quelques dizaines à quelques centaines de mètres, permettant ainsi de mieux comprendre les mécanismes à l'origine de ces tremblements de terre. Le pic de 1992 est lié à l'occur-

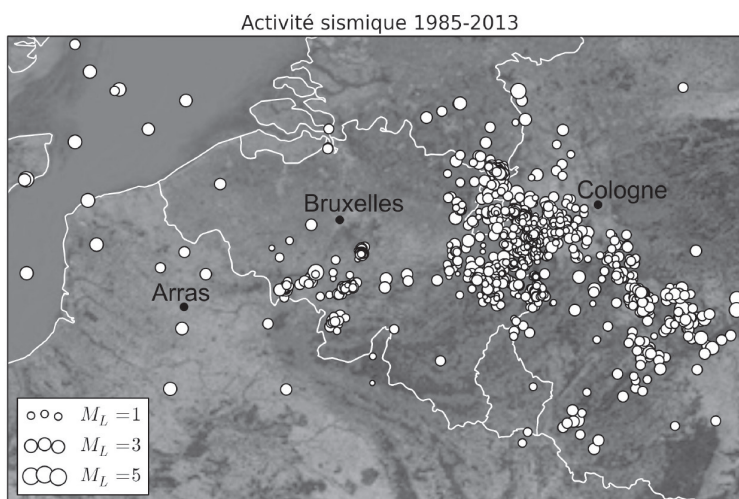


Figure 2 : L'activité sismique dans nos régions de 1985 à 2013. La dimension des cercles indiquant la localisation de l'épicentre des tremblements de terre est proportionnelle à leur magnitude. La grandeur des cercles correspondant aux magnitudes $M_L = 1,0, 3,0$ et $5,0$ est indiquée dans la légende.

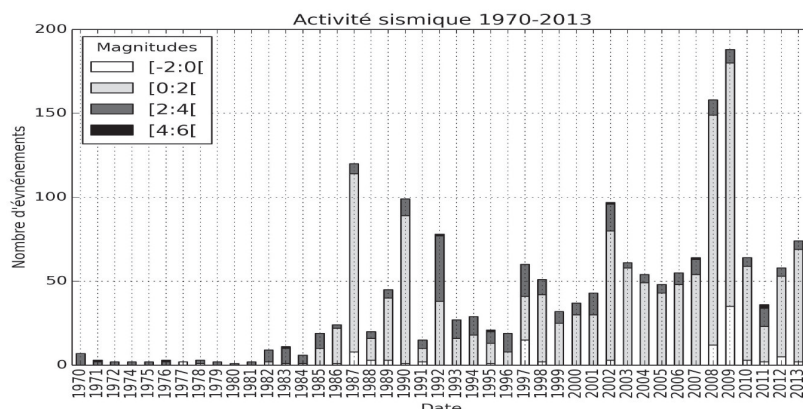


Figure 3 : Nombre de séismes localisés annuellement dans nos régions par le réseau de surveillance sismique belge de 1970 à 2013

rence du séisme de Roermond et de ses nombreuses répliques. Indépendamment de ces pics, la période 1985-1996 est caractérisée par une détection plus réduite des événements de magnitude inférieure à 2,0 par rapport à la période 1997-2013. Cette différence est due au fait qu'en 1997, l'Observatoire royal a participé au projet « Eifel Plume » dont l'objectif était de réaliser une tomographie sismique dans l'Eifel. Durant ce projet, de nombreuses stations ont été implantées en Ardenne pendant une période de 6 mois, et une nouvelle procédure de contrôle continu des

traces sismiques des meilleures stations du réseau a été mise en oeuvre, améliorant la récupération des tremblements de terre les plus faibles, qui auparavant échappaient à l'attention du sismologue. Les maxima en 2008 et 2009 sont liés à la détection de très petits séismes grâce à l'installation d'un réseau sismique temporaire lors de la séquence de tremblements de terre survenus dans le Brabant Wallon, de juillet 2008 à janvier 2010.

La Figure 4 montre la distribution des séismes repris à la Figure 2 en fonction de leur magnitude.

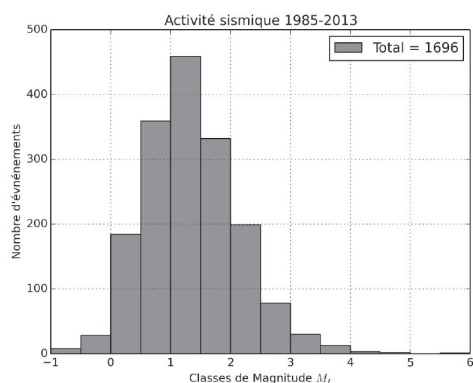


Figure 4 : Distribution par classe de magnitude des 1696 tremblements de terre localisés dans nos régions par le réseau de surveillance sismique belge depuis 1985

Le tremblement de terre destructeur de Roermond du 13 avril 1992 est celui dont la magnitude a été la plus élevée ($M_L=5,8 - M_W=5,3$). Cinq autres tremblements de terre ont eu une magnitude dépassant $M_L=4,0$. Parmi ceux-ci, celui du 20 juin 1995 de magnitude $M_L=4,5$, localisé dans la région du Roelux, a été ressenti sur tout le territoire de notre pays, mais n'a causé que des dégâts très légers, en raison de sa profondeur de 24 km. Pour un aperçu exhaustif de l'activité sismique dans nos régions, le lecteur intéressé pourra consulter la référence *Camelbeeck et al. (2007)*.

Un réseau accélérométrique depuis 1999

Lors des tremblements de terre de Liège et de Roermond, il n'a pas été possible de mesurer les mouvements du sol ressentis dans la zone épiscopale, où des dégâts parfois importants ont été observés. Des problèmes similaires se posent au voisinage de l'épicentre de séismes de magnitude $M_W \geq 4,0$, où les accélérations qui dépassent 0,05 g peuvent saturer les sismomètres (g est l'accélération de la pesanteur, $9,81 \text{ m/s}^2$). C'est ce qui a conduit les sismologues et ingénieurs européens

à mettre en œuvre des réseaux d'accéléromètres dans le but d'enregistrer les mouvements forts du sol dans les zones sismiques du nord-ouest de l'Europe.

A cette fin, 19 accélérographes, financés pour la plupart par la Loterie Nationale, ont été installés depuis 1999 dans des zones sensibles du pays, à savoir dans les provinces de Liège, du Limbourg et du Hainaut (Figure 1). Le choix de ces emplacements a pris en considération les différents types de sol, de même que la présence d'ouvrages de génie civil. La plupart des stations de mesures se trouvent dans des bâtiments communaux afin de garantir la continuité des mesures et un accès aisé.

Des précisions sur ce réseau accélérométrique et sur les enregistrements collectés à l'occasion du séisme de magnitude $M_L=4,9$ qui a secoué la région d'Alsdorf en Allemagne le 22 juillet 2002 sont fournies dans *Ciel et Terre*, vol 119 (1), par *Camelbeeck et al. (2003)*.

Un système d'alerte sismique en Belgique depuis 2008

Dans *Ciel et Terre* Vol 127 (5) de septembre-octobre 2011 a été présenté le système d'alerte aux tremblements de terre tel qu'il a été développé depuis 2008 à l'Observatoire. Ce système est composé de deux dispositifs complémentaires. Le premier se base sur l'analyse en temps réel des données acquises par l'ensemble des stations du réseau sismique. Le second utilise le comportement des visiteurs de notre site web <http://www.seismologie.be>.

L'évolution technologique à la base de l'installation du réseau de stations numériques et les connexions Internet à coûts relativement faibles par rapport aux anciennes lignes RNIS autorisent de nos jours un flux de données en temps réel entre nos stations sismiques et un de nos serveurs de données sismiques à Uccle. Ce serveur récupère également les données de 30 stations de réseaux mondiaux. Cette configuration permet de détecter des séismes de magnitude supérieure ou égale à 1,5 dans nos régions en évitant au maximum les fausses alertes. Un courriel est envoyé aux sismologues chaque fois qu'un séisme est détecté. Cet avis contient l'ensemble des informations nécessaires à l'alerte: localisation et magnitude, représentation graphique des enregistrements sismiques et une estimation de la population habitant à proximité de l'épicentre.

Un autre serveur surveille l'activité des visiteurs sur notre site web. Lorsqu'un flux anormal est détecté, c'est généralement le signe qu'un séisme vient de se produire et le système envoie un courriel et un SMS d'alerte mentionnant le flux moyen des visites durant la dernière heure, la dernière minute et les dernières 20 secondes. En un coup d'œil, on peut ainsi évaluer l'ampleur de l'impact. De plus, les visiteurs qui ont ressenti un séisme prennent souvent le temps de remplir le questionnaire d'enquête «Avez-vous ressenti un séisme?», disponible en quatre langues. L'analyse automatique de ces questionnaires donne une information directe sur l'impact d'un séisme, c'est-à-dire sur la manière dont il a été ressenti par la population et sur les éventuels dégâts qu'il a occasionnés.

Environ 5 à 10 minutes après un séisme ressenti, le Service est maintenant capable de fournir

une information préliminaire sur la localisation, sur la magnitude et sur l'impact du séisme, pour autant que le système informatique fonctionne. Ces informations auraient été très utiles lors du séisme de Liège le 8 novembre 1983. Cette nuit-là, en pleine guerre froide et dans une région proche d'une centrale nucléaire, les rumeurs les plus folles couraient sur l'origine des secousses et il aura fallu attendre plus de quatre heures pour que l'information de l'occurrence d'un séisme parvienne à tous. De nos jours, les nouveaux réseaux et moyens de communication permettent et imposent que tout aille très vite. Maintenant le Service est capable non seulement de répondre rapidement à la question «était-ce un séisme?» mais également de fournir l'information importante au sujet de cet événement.

Ce système d'alerte a été créé pour que les sismologues de l'Observatoire royal soient avertis très rapidement de l'occurrence d'un séisme dans nos régions. Des procédures simples et rapides de validation de l'information fournie automatiquement par l'alerte ont été développées. Comme il n'y a pas à l'Observatoire royal de service d'astreinte garantissant la présence d'un sismologue 24h sur 24, le système d'alerte rapide est donc d'autant plus utile qu'il permet d'optimiser la réaction des sismologues pouvant se rendre disponibles, y compris en dehors des heures de service ou encore lorsque des collègues sont

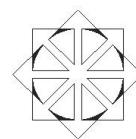
en mission scientifique. Depuis 2008, de nombreuses alertes ont été déclenchées, en majorité lors de la séquence sismique qui s'est produite dans la région de Court-Saint-Etienne en 2008-2010, et jusqu'à présent la réponse du Service a pu être efficace.

Et demain?

Dans cet article ont été présentées les différentes évolutions du réseau de surveillance sismique moderne en Belgique. Au cours de ces trente dernières années, les données collectées par ces stations sismiques ont apporté une nouvelle compréhension des tremblements de terre et de l'activité sismique dans nos régions. La dernière étape a conduit vers un système d'alerte très efficace. Que peut-on encore faire pour améliorer la surveillance sismique dans nos régions ?

Lors d'un futur séisme destructeur, on peut estimer raisonnablement à plus de 100.000 le nombre de Belges en situation de remplir le questionnaire du Service sur les effets du séisme, résidant ou s'étant trouvé bien évidemment dans les régions où l'événement aura été ressenti, mais pas nécessairement dans la région épiscopale dès lors que les victimes du séisme auront bien d'autres préoccupations que celle de remplir une enquête sur internet. Une information sur l'impact du séisme pourra ainsi être diffusée assez rapidement grâce

à cette enquête sur Internet et aux enregistrements des réseaux sismique et accélérométrique permanents. Toutefois, la densité spatiale de ces stations n'est cependant pas encore suffisante pour fournir une information fiable sur les mouvements du sol ressentis localement, une donnée pourtant essentielle pour que les ingénieurs puissent évaluer rapidement si les constructions, les ouvrages d'art ou les diverses installations à risques ont bien résisté au tremblement de terre ou risquent d'avoir subi des dégâts. Pour répondre à cette demande et également pouvoir fournir des données permettant de mieux définir les paramètres de l'action sismique à prendre en compte dans nos régions et d'analyser la vulnérabilité des bâtiments en fonction des mouvements du sol, il est développé depuis trois ans des petites stations accélérométriques à bas prix à connecter directement sur Internet. Dans une phase expérimentale, le Service envisage d'en installer plusieurs dizaines sur le territoire belge afin d'évaluer l'habileté de ces instruments à fournir en temps quasi réel des cartes d'impact qui reprennent les mouvements forts du sol et permettent d'analyser dans quelle mesure ces informations peuvent être corrélées avec les intensités résultant de l'enquête Internet «Avez-vous ressenti un séisme?».



Références

- Camelbeeck, T., Van Camp, M., Martin, H., Van de Putte, W., Béatse, H., Bukasa, B., Castelein, S., Collin, F., Hendrickx, M., Petermans, T., Snissaert, M., Vanneste, K., Verbeeck, K., Verbeiren, R. (2003). *Les effets en Belgique du tremblement de Terre du 22 juillet 2002*. Ciel et Terre, 119, 1, 14-19.
- Camelbeeck, T., Vanneste, K., Alexandre, P., Verbeeck, K., Petermans, T., Rosset, P., Everaerts, M., Warnant, R. and Van Camp, M. (2007). *Relevance of active faulting and seismicity studies to assess long term earthquake activity in Northwest Europe, Continental Intraplate Earthquakes: Science, Hazard, and Policy Issues*. Geological Society of America, S. Stein and S. Mazzotti (eds.), Special Paper 425, 193-224.
- Lecocq, T., Rapagnani, G. et Camelbeeck, T. (2011). *L'alerte et le séisme-homme-mètre*. Ciel et Terre, 139-142.
- Van Camp, M., et Camelbeeck, T. (2004). *Histoire des stations sismiques belges : de la station «Solway» au réseau national de surveillance sismique*. Ciel et Terre 120 (6), 162-176.