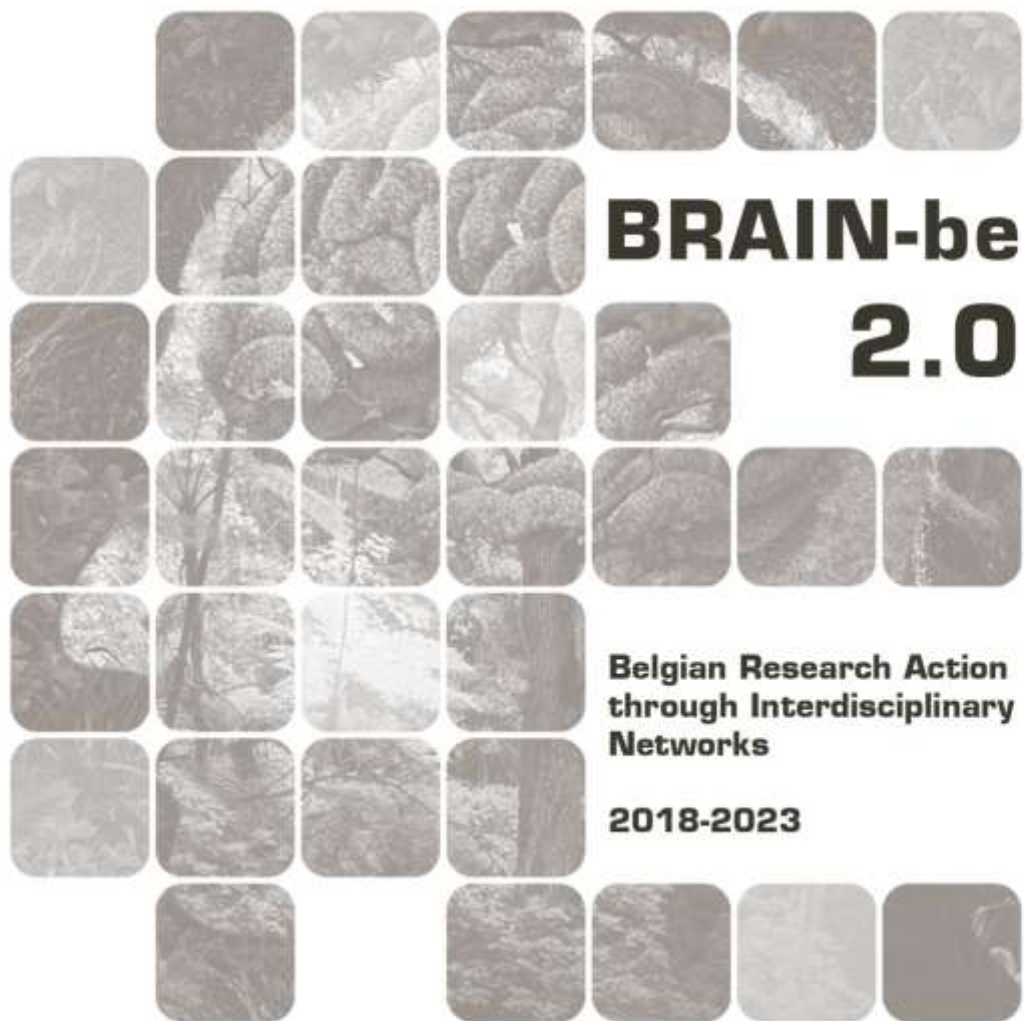




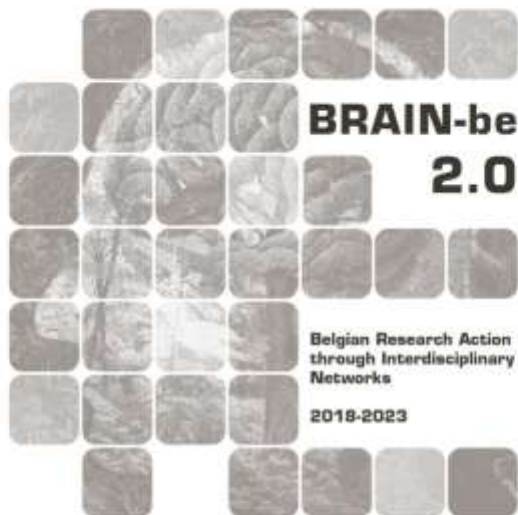
BELSHAKE

Earthquake ground-motion database and modeling in Belgium

Kris Vanneste & Mahsa Onvani (Royal Observatory of Belgium)

Pillar 1: Challenges and knowledge of the living and non-living world





BOTTOM-UP PROJECT

BELSHAKE

Earthquake ground-motion database and modeling in Belgium

Contract - B2/202/P1

RÉSUMÉ

PROMOTORS: Kris Vanneste (Royal Observatory of Belgium)

AUTHORS: Kris Vanneste (Royal Observatory of Belgium)
Mahsa Onvani (Royal Observatory of Belgium)

DOI: <https://doi.org/10.24414/w1fn-qy14>





Published in 2026 by the Belgian Science Policy Office

WTCIII

Simon Bolivarlaan 30 bus 7

Boulevard Simon Bolivar 30 bte 7

B-1000 Brussels

Belgium

Tel: +32 (0)2 238 34 11

<http://www.belspo.be>

<http://www.belspo.be/brain-be>

Contact person: Koen Lefever

Tel: +32 (0)2 238 35 51

Neither the Belgian Science Policy Office nor any person acting on behalf of the Belgian Science Policy Office is responsible for the use which might be made of the following information. The authors are responsible for the content.

No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without indicating the reference:

Vanneste K. & Onvani M. **BELSHAKE – Earthquake ground-motion database and modeling in Belgium**. Final Report. Brussels: Belgian Science Policy Office 2026 – 138 p. (BRAIN-be 2.0 - (Belgian Research Action through Interdisciplinary Networks))

RÉSUMÉ

1.1. Contexte

La Belgique, et l'Europe du Nord-Ouest en général, est située dans une région continentale stable ou intraplaque, caractérisée par une activité sismique faible à modérée. Néanmoins, des tremblements de terre dommageables se sont produits ici aussi. Les plus importants au cours du XX^e siècle sont le séisme de Zulzeke-Nukerke en 1938 (magnitude $M=5,0$), le séisme de Liège en 1983 ($M=4,6$) et le séisme de Roermond (NL) en 1992 ($M=5,3$). Les archives historiques indiquent que des tremblements de terre plus importants se sont produits par le passé, comme le séisme de 1580 dans la Manche ($M=6,0$) et le séisme de Verviers en 1692 ($M=6,3$). Ces éléments montrent que des tremblements de terre dommageables, bien qu'infréquents, se produisent dans notre région et que, par conséquent, l'aléa sismique n'est pas négligeable. Les cartes d'aléa sismique européennes montrent que la Belgique présente un niveau d'aléa plus élevé que les zones adjacentes en France, au Royaume-Uni, en Allemagne et aux Pays-Bas. Les évaluations de l'aléa sismique (EAS) fournissent des éléments essentiels aux ingénieurs pour concevoir des bâtiments et infrastructures résistants aux séismes. Citons par exemple les cartes d'aléa nationales utilisées dans le cadre du code européen de construction Eurocode 8, ainsi que les EAS spécifiques pour des infrastructures critiques telles que les installations nucléaires ou les industries classées SEVESO. Un composant essentiel de l'EAS est constitué par les modèles de mouvement du sol (MMS), qui relient le mouvement sismique à la magnitude, à la distance épicentrale, ainsi qu'à d'autres caractéristiques éventuelles de la source, du trajet et du site. De fortes variations du mouvement du sol sont observées entre différentes régions du monde, principalement en raison de caractéristiques d'atténuation différentes de la croûte. Toutefois, très peu de MMS existent pour les zones intraplaques, et aucun spécifiquement pour la Belgique. En conséquence, les EAS en Belgique ont jusqu'à présent dû s'appuyer sur des MMS développés pour d'autres régions du monde. Bien que la sélection des MMS se soit perfectionnée au fil des années, leur validité pour nos régions n'a pas été testée et leur pondération reste subjective. Étant donné que, dans les EAS probabilistes, la branche mouvement du sol de l'arbre logique est l'une des principales sources d'incertitude, il existe clairement un besoin de données de mouvement du sol provenant de régions à faible sismicité.

Les bases de données de mouvement du sol sont des ressources fondamentales pour le développement de MMS. Au cours des deux dernières décennies, plusieurs initiatives internationales ont collecté des données d'accélérations fortes, telles que le projet Next Generation Attenuation (NGA) aux États-Unis, et les projets suivants NGA-West et NGA-East, la base de données KiK-net au Japon, la base ITACA en Italie, la base RESORCE pour l'Europe et le Moyen-Orient, ainsi que la base mondiale Engineering Strong Motion. Ces bases contiennent principalement des données provenant des régions les plus actives du monde, où les séismes sont plus nombreux. Un grand nombre de MMS ont été dérivés de ces bases de données. À l'inverse, les zones intraplaques, où la sismicité est beaucoup plus faible, sont beaucoup moins représentées. Bien que la grande majorité des données enregistrées dans ces régions concernent des signaux de faible amplitude issus de séismes dont la magnitude est inférieure à la plage pertinente pour l'EAS ($M_W \geq \sim 4,5$), des projets récents de compilation de bases de données de mouvement du sol en France, en Suisse et en Australie ont montré qu'il est non seulement possible, mais aussi utile, de mener des études similaires pour la Belgique.

1.2. Objectifs

Les considérations ci-dessus ont motivé le lancement d'un projet dédié, BELSHAKE, qui vise à combler une lacune dans le savoir-faire et dans la collecte de données en matière de mouvement sismique par rapport à la communauté sismologique internationale. Les données sismiques actuellement disponibles en Belgique sont principalement utilisées pour détecter et localiser les séismes régionaux, ainsi que pour déterminer leurs principales caractéristiques de source (profondeur focale, magnitude locale, mécanisme au foyer, etc.). Cependant, un inventaire systématique de ces données en vue de la modélisation du mouvement du sol n'avait pas encore été entrepris. Les objectifs principaux du projet sont doubles : (1) construire une base de données des mouvements sismiques enregistrés en Belgique et dans les régions adjacentes; (2) développer la capacité à modéliser le mouvement du sol dû aux séismes en Belgique sur la base de cette base de données. Cela permettra d'évaluer la validité des MMS existants pour la Belgique et, à terme, de développer un modèle spécifiquement adapté à notre pays. La méthodologie utilisée est bien établie, mais n'a été appliquée que partiellement dans le contexte belge. Ainsi, le sujet et la méthodologie s'inscrivent dans l'état de l'art international.

1.3. Résultats

Le résultat le plus important du projet BELSHAKE est le développement d'une nouvelle base de données de mouvement sismique pour la Belgique et les régions environnantes, à savoir la base de données BELSHAKE. Cette base s'appuie sur des données d'ondes numériques disponibles depuis 1985 et contient actuellement environ 6 400 enregistrements issus de 327 séismes tectoniques et 17 séismes induits avec $M \geq 2$. Des efforts considérables ont été déployés pour garantir que les données d'ondes, les métadonnées et les mesures d'intensité dérivées (MI) respectent les bonnes pratiques fixées par les bases internationales de mouvement du sol. Toutes les formes d'ondes ont été inspectées visuellement, et les problèmes identifiés ont été soit corrigés, soit signalés. Un défi majeur a concerné la reconstruction d'informations manquantes sur la réponse instrumentale pour les enregistrements plus anciens, nécessaire pour convertir le mouvement enregistré en unités physiques et corriger les caractéristiques instrumentales. Nous avons appliqué plusieurs méthodes et évalué leur validité de différentes manières. Les enregistrements dont la réponse instrumentale a été jugée peu fiable ont été marqués dans la base de données afin d'éviter leur utilisation lors des étapes ultérieures. Tous les enregistrements fiables ont été traités selon un flux de travail semi-automatisé et uniforme. Les étapes de traitement et leur ordre ont été adaptés, avec quelques variations, à partir des protocoles d'autres bases de données de mouvement du sol reconnues. Ensuite, jusqu'à 109 mesures d'intensité ont été calculées à partir des données traitées, pour plus de 120 000 combinaisons enregistrement–composante–fenêtre. Nous avons également déterminé les magnitudes de moment pour 294 événements de la base et vérifié leur fiabilité en comparant différentes méthodes et en les confrontant aux valeurs d'autres catalogues sismiques. Enfin, divers contrôles de cohérence ont été réalisés pour garantir la qualité et la fiabilité des MI, notamment l'évaluation des rapports de composantes, l'analyse résiduelle par rapport à un MMS générique, la comparaison entre stations co-localisées et la comparaison avec des événements communs dans la base française RESIF/EPOS-France. Les MI anormales ont été analysées, et les valeurs problématiques corrigées ou retirées. Les résiduels finaux ne montrent aucune tendance détectable avec la distance ou la magnitude et varient dans une plage étroite similaire, voire inférieure, à celle de la base de données française. La base de données BELSHAKE a déjà démontré son utilité, notamment en permettant la recalibration de l'échelle locale de magnitude belge, réalisée en parallèle du projet. Cela a fourni de nouvelles informations sur l'étalement géométrique et la durée du trajet, des résultats importants pour le projet.

Dans la seconde partie du projet, nous avons d'abord analysé l'atténuation anélastique des ondes sismiques en Belgique via le facteur d'atténuation haute fréquence κ , déterminé pour tous les enregistrements de la base de données BELSHAKE. L'analyse de la relation κ -distance, en utilisant différentes méthodes d'ajustement, a permis de décomposer κ en composantes spécifiques au site (κ_0) et en composantes régionales (gradient κ_r) au sein de quatre domaines crustaux. Nos résultats montrent que les variations de κ_r sont relativement faibles, avec une moyenne globale correspondant à un facteur Q apparent (indépendant de la fréquence) d'environ 1750, confirmant que l'atténuation régionale en Belgique est relativement faible. La comparaison des valeurs κ_0 spécifiques au site avec V_{S30} , la vitesse moyenne des ondes de cisaillement dans les 30 premiers mètres, montre des valeurs relativement constantes sur une large plage de V_{S30} pour les stations situées sur le socle rocheux. Cela indique que la roche de haute V_{S30} en Belgique ne présente pas les faibles valeurs κ_0 typiques du socle dur par exemple en Amérique du Nord de l'Est. Ensuite, nous avons évalué le degré d'accord de plus de 20 MMS publiés par rapport aux données observées dans la base de données BELSHAKE, en utilisant plusieurs mesures statistiques. Bien qu'aucun modèle ne surpasse tous les autres de manière systématique, plusieurs montrent de bonnes performances stables. Un résultat intéressant et inattendu est que les versions à faible atténuation des MMS NGA-West développés pour la Californie, une région de frontière de plaque, correspondent mieux aux données que les MMS NGA-East développés pour une région intraplaque (l'Est de l'Amérique du Nord), tant en termes de valeurs absolues que de forme spectrale. Sur cette base, nous avons appliqué une approche relativement simple (*Referenced Empirical Approach*) pour ajuster certains des MMS testés à la situation belge. Nos analyses montrent que cette méthode doit être appliquée avec prudence: elle ne convient qu'aux modèles nécessitant des ajustements mineurs et dont les formes spectrales ne diffèrent pas trop des observations. Il faut également vérifier que les résiduels ne montrent aucune tendance avec la magnitude, afin d'éviter un biais pour les magnitudes plus élevées pertinentes pour l'EAS. Néanmoins, trois modèles ont pu être ajustés de manière fiable. Le plus prometteur, qui présente le meilleur accord avec la base de données BELSHAKE, est un modèle stochastique développé pour le Royaume-Uni. De plus, grâce à l'échange de données internationale, d'autres chercheurs ont calibré un MMS paneuropéen avec une méthode plus sophistiquée, qui dépassait le cadre du projet BELSHAKE. Enfin, nous avons mis en œuvre deux méthodes, EGF et EXSIM, pour simuler le mouvement du sol issu de séismes de plus forte magnitude. À titre de preuve de concept, nous avons simulé des mouvements réalistes pour le plus grand séisme dans la base de données, celui de Roermond en 1992. Cet exercice a profité d'autres résultats du projet, tels que les composantes de κ liées au trajet et au site, les valeurs V_{S30} des stations belges, ainsi que les nouveaux modèles d'étalement géométrique et de durée de trajet. Nous avons ainsi ouvert la voie à la simulation stochastique de signaux accélérométriques pour des séismes hypothétiques de forte magnitude correspondant aux caractéristiques moyennes de source, trajet et site en Belgique et aux alentours.

1.4. Conclusions

Les données sismiques disponibles en Belgique ont jusqu'à présent été sous-exploitées pour les applications de sismologie de l'ingénieur. Le projet BELSHAKE a permis d'établir la première base de données de mouvement du sol destinée à cet usage. Grâce à ses enregistrements vérifiés, à l'intégration des réponses instrumentales et aux métadonnées complètes, la base de données BELSHAKE constitue une ressource de haute qualité pour le mouvement du sol en Belgique, comme en témoignent les faibles incertitudes sur les localisations épicentrales et les magnitudes, ainsi que les faibles résiduels. Bien que la plage de magnitude soit relativement limitée (principalement $M \leq 4$), la

base de données contient des informations importantes sur les caractéristiques de la source, du trajet et du site dans notre région. Elle complète les bases de données existantes en augmentant la couverture des zones à faible sismicité et des petites magnitudes. Elle servira également de référence pour de nombreuses autres applications sismologiques, comme en témoigne la recalibration de l'échelle locale de magnitude belge réalisée en parallèle du projet.

En utilisant la base de données BELSHAKE, nous avons caractérisé de manière plus détaillée qu'auparavant l'étalement géométrique et l'atténuation anélastique en Belgique. Elle a également permis d'évaluer quels MMS publiés s'accordent le mieux avec les observations, et nous avons pu en calibrer certains. Ainsi, et pour la première fois, nous avons développé des MMS spécifiquement adaptés à la Belgique, basés sur des données locales. Cela permettra une sélection plus informée et fondée sur les données des MMS dans les EAS. En parallèle, nous avons développé la capacité de simuler le mouvement du sol pour des séismes de plus grande magnitude. Ensemble, ces avancées posent les bases solides de futurs développements en modélisation du mouvement du sol en Belgique. Nos résultats seront très utiles pour les nouvelles EAS en Belgique, notamment pour la révision de l'Eurocode 8, ainsi que pour la prolongation ou l'implantation de nouvelles installations nucléaires.

1.5. Mots clefs

Tremblements de terre, modèle de mouvement du sol, base de données, aléa sismique, atténuation sismique