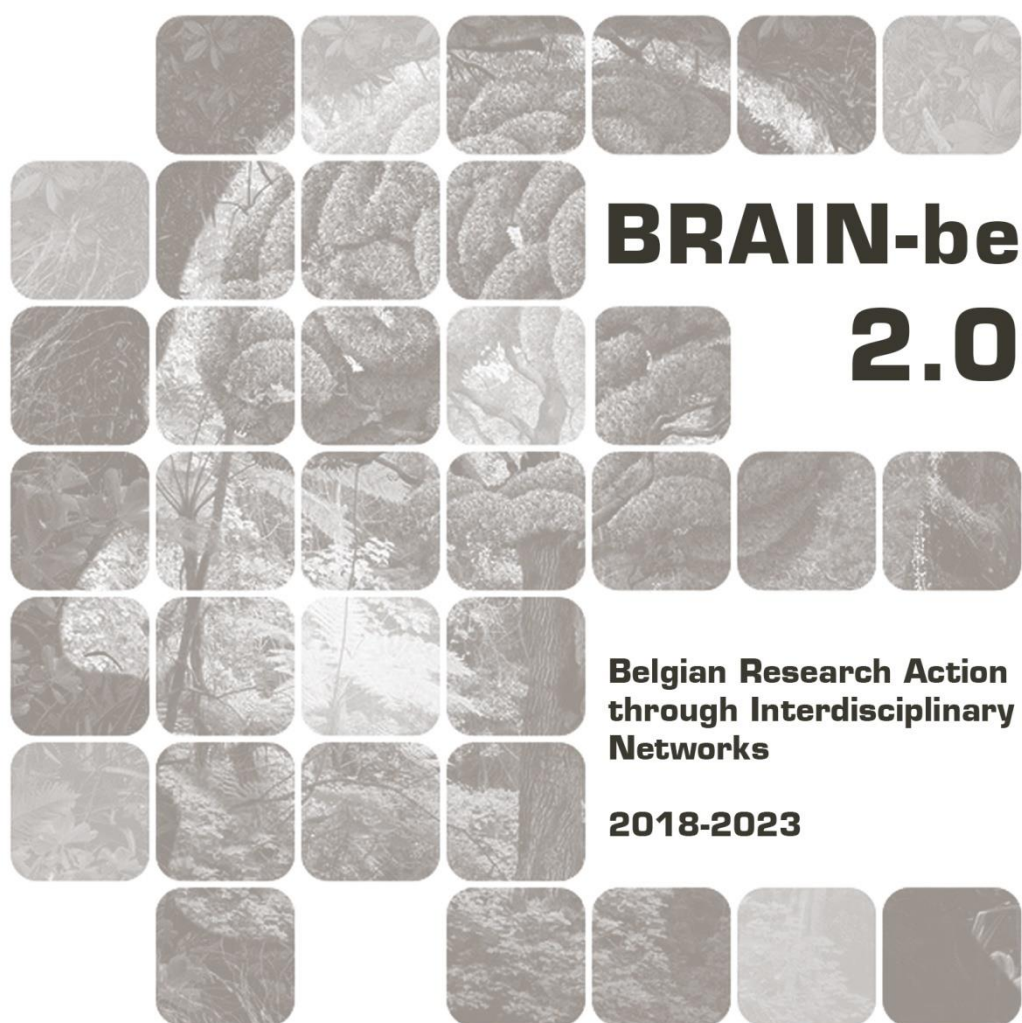




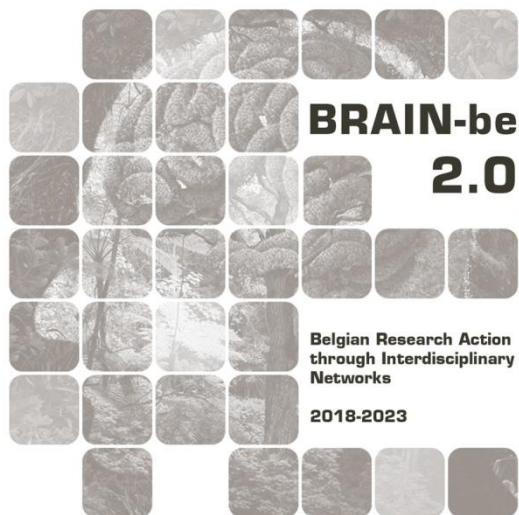
BELSHAKE

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

SUMMARY

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))

SUMMARY (ENGLISH)

1.1. Context

Belgium, and NW Europe in general, is situated in a stable continental or intraplate region, characterized by low to moderate seismic activity. Nevertheless, damaging earthquakes have occurred here too. The most important ones during the 20th century are the 1938 Zulzeke-Nukerke (magnitude $M = 5.0$), the 1983 Liège ($M = 4.6$) and the 1992 Roermond (NL) earthquakes ($M = 5.3$). Historical records indicate that larger earthquakes have occurred in the past, such as the 1580 earthquake in the English Channel ($M \cong 6.0$) and the 1692 Verviers earthquake ($M \cong 6.3$). This evidence shows that damaging earthquakes, although infrequent, do occur in our region, and hence that seismic hazard is not negligible. European seismic hazard maps depict Belgium as a region with elevated hazard compared to adjacent areas in France, the United Kingdom (UK), Germany and The Netherlands. Seismic hazard assessments (SHAs) provide essential input for engineers to design earthquake-resistant buildings and infrastructure. Examples include country-wide hazard maps in support of the European building code Eurocode 8 and site-specific SHAs for critical infrastructure such as nuclear facilities, SEVESO classified industries, etc. A crucial component of SHA are ground-motion models (GMMs), which relate earthquake ground motion to magnitude, epicentral distance, and possibly other source, path and site properties. Strong variations in ground motion are observed between different regions of the world, mainly due to different crustal attenuation characteristics. However, very few GMMs are available for intraplate areas and none specifically for Belgium. Consequently, SHAs in Belgium so far had to rely on GMMs developed for other parts of the world. Although the selection of GMMs has grown more sophisticated over the years, their validity for our regions has not been tested and their weighting remains subjective. Considering that in probabilistic SHA, the ground motion branch of the logic tree is one of the main contributors to uncertainty, there is clearly a need for ground-motion data from lower-seismicity regions.

Earthquake ground-motion databases are fundamental resources for the development of GMMs. In the past two decades, several international efforts have collected strong-motion data, such as the Next Generation Attenuation (NGA) project in the United States, and the follow-up projects NGA-West and NGA-East, the KiK-net database in Japan, the ITACA database in Italy, the RESORCE database for Europe and the Middle East, and the worldwide Engineering Strong Motion database. These databases predominantly contain data from the most active regions of the world, where earthquakes are more abundant. A large number of GMMs have been derived from these databases. In contrast, intraplate areas, where seismicity is much lower, are much less represented. Although the vast majority of recorded data in these regions concern weak-motion records from earthquakes with magnitudes lower than the magnitude range relevant for SHA ($M \geq \sim 4.5$), recent successful projects to compile ground-motion databases in France, Switzerland and Australia have demonstrated that it is not only feasible, but also valuable, to conduct similar studies for Belgium.

1.2. Objectives

The above considerations provided the rationale to launch a dedicated project, BELSHAKE, which intends to bridge a gap in know-how and in data collection in the field of earthquake ground-motion with respect to the international seismological community. The currently available seismic data in Belgium are mainly used to detect and locate regional earthquakes, and to determine their main source characteristics (e.g., focal depth, local magnitude, focal mechanism), but a systematic inventory of these data for the purpose of ground-motion modelling has not been undertaken yet.

The main objectives of the project are twofold: (1) to build a database of recorded earthquake ground motion in Belgium and adjacent regions, and (2) to develop the capacity to model ground motion due to earthquakes in Belgium based on this database. This will allow to evaluate the validity of existing GMMs in Belgium and ultimately to develop a model specifically for our country. The used methodology is well-established, but has not, or only in part, been applied in the Belgian context. Thus, both the topic and the methodology are situated within the international state-of-the-art.

1.3. Results

The most important result of the BELSHAKE project is the development of a new earthquake ground-motion database for Belgium and surrounding regions, i.e. the BELSHAKE database. This database is based on digital waveform data starting from 1985 and currently contains ~6400 records from 327 tectonic and 17 induced earthquakes with $M \geq 2$. Considerable efforts were undertaken to ensure that both the waveform data, the metadata and the derived intensity measures (IMs) adhere to the best practices set by international ground-motion databases. All waveforms have been visually inspected, and problems were either corrected or flagged. A main challenge we encountered concerns the reconstruction of missing instrument response information for older records. This information is required to convert recorded ground motion to physical units and to correct for instrument characteristics. We applied different methods and evaluated their validity in different ways. Records for which instrument response was found to be unreliable, were flagged in the database, preventing them to be used in subsequent steps. All reliable records were processed using a semi-automated, uniform workflow. The processing steps and the order in which they are applied have been adapted with slight variations from the schemes in established ground-motion databases. Subsequently, up to 109 intensity measures were computed from the processed data, for more than 120,000 record-component-window combinations. We also determined moment magnitudes from the waveform data for 294 events in the database and confirmed their reliability by comparing the results of different methods and comparing with values in other seismic catalogs. Finally, we performed various consistency checks to ensure the quality and reliability of IMs, including evaluation of different component ratios, residual analysis with respect to a generic GMM, comparison of co-located stations, and comparison with common events in the French RESIF/EPOS-France database. Anomalous IMs were analysed, and problematic values were either corrected or removed. The final residuals show no discernible trend with distance or magnitude, and vary in a narrow range that is similar to or even smaller than that in the database for France. The BELSHAKE database has already proven its value, as it allowed a recalibration of the Belgian local magnitude scale in parallel to this project. This in turn provided new insights in geometrical spreading and path duration, which are important results for the project as well.

In the second part of the project, we first analysed anelastic attenuation of seismic waves in Belgium through the high-frequency attenuation factor kappa (κ), which was determined for all records in the BELSHAKE database. Analysis of the κ -distance relationship using different fitting methods allowed decomposing whole-path κ values into site-specific (κ_0) and regional (kappa gradient κ_r) components in four crustal domains. Our results show that variations in κ_r are relatively small, with an overall average corresponding to an apparent (frequency-independent) Q factor around 1750, confirming that regional attenuation in Belgium is relatively low. Comparison of site-specific κ_0 values with V_{S30} , the average shear-wave velocity in the top 30 m, shows relatively constant values over a broad V_{S30} range for stations situated on bedrock. This indicates that bedrock with high V_{S30} in Belgium does not show the low κ_0 values typical of hard rock in e.g. Eastern North America.

Subsequently, we evaluated the goodness-of-fit of more than 20 published GMMs with respect to observed data in the BELSHAKE database, using multiple statistical measures. Although no single model consistently outperforms all others, several models demonstrate good and stable performance across different measures. An interesting and unexpected finding is that low-attenuation versions of NGA-West GMMs for California, a plate boundary, match the data better than NGA-East GMMs for the intraplate region of Eastern North America, both in terms of absolute values and in spectral shape. Building on this result, we applied the relatively simple Referenced Empirical Approach to adjust some of the tested GMMs to the Belgian situation. Our analyses show that this method should be applied carefully. It should be limited to models requiring only minor adjustment and with spectral shapes that are not too different from those observed. It should also be verified that the residuals do not show any trend with magnitude to avoid bias for higher magnitudes relevant in SHA. Nevertheless, we identified three models that could be reliably adjusted. The most promising of those is a stochastic model developed for the UK, which shows the best fit to the BELSHAKE database. In addition, thanks to data international data exchange other researchers have determined factors to calibrate a pan-European GMM using a more sophisticated method, which was beyond the possibilities in the BELSHAKE project. Finally, we also implemented two methods, EGF and EXSIM, to simulate ground motion from higher-magnitude earthquakes. As a proof of concept, we simulated realistic ground motions for the largest earthquake in the database, the 1992 Roermond earthquake. This exercise benefited from other results obtained in the project, such as the path and site components of κ , V_{S30} values for Belgian seismic stations, along with the newly derived geometrical spreading and path duration models. Thus, we have paved the way for stochastic simulation of accelerograms for hypothetical high-magnitude earthquakes that are in agreement with the average source, path and site characteristics in and around Belgium.

1.4. Conclusions

Available seismic data in Belgium have so far been underexploited in terms of engineering seismological applications. In the BELSHAKE project, we established the first ground-motion database serving this purpose. Thanks to its quality-checked records, integrated instrument response information and comprehensive metadata, the BELSHAKE database is a high-quality resource for earthquake ground motion in Belgium, as attested by the small uncertainties on epicentral locations and magnitudes, and the low residuals. Although the magnitude coverage is relatively limited (mainly $M \leq 4$), it contains important information on source, path and site characteristics of ground motion in our regions. The database complements existing databases by increasing the coverage of low-seismicity zones and lower magnitudes. In addition, it will serve as a reference dataset for many other seismological applications. An example is the recalibration of the Belgian local magnitude scale performed alongside this project.

Using the BELSHAKE database, we have characterised both geometrical spreading and anelastic attenuation in Belgium in more detail than before. It also allowed evaluating which published GMMs show the best agreement with observations, and we managed to calibrate a few of these models. Thus, and for the first time, we developed GMMs specifically for Belgium based on local data. This will allow better informed and data-driven selection of GMMs in SHA. In parallel, we developed the capacity to simulate ground motion from higher-magnitude earthquakes. Together, these advances lay a solid foundation for further developments in ground-motion modelling in Belgium. Our results will be very useful for new SHAs in Belgium, such as will be needed for the revision of Eurocode 8, as well as for the prolongation of existing or the siting of new nuclear facilities.

1.5. Keywords

Earthquakes, ground-motion model, database, seismic hazard, seismic attenuation

SUMMARY (DUTCH)

1.6. Context

België, en meer algemeen Noordwest-Europa, bevindt zich in een stabiele continentale of intraplaatregio, gekenmerkt door een lage tot matige seismische activiteit. Niettemin hebben zich ook bij ons beschadigende aardbevingen voorgedaan. De belangrijkste aardbevingen in de 20^e eeuw zijn die van Zulzeke-Nukerke in 1938 (magnitude $M = 5,0$), Luik in 1983 ($M = 4,6$) en Roermond (NL) in 1992 ($M = 5,3$). Historische bronnen geven aan dat in het verleden grotere aardbevingen hebben plaatsgevonden, zoals de aardbeving van 1580 in het Kanaal ($M \cong 6,0$) en de aardbeving van Verviers in 1692 ($M \cong 6,3$). Dit toont aan dat beschadigende aardbevingen, hoewel zeldzaam, toch in onze regio voorkomen en dat de seismische dreiging dus niet verwaarloosbaar is. Europese seismische dreigingskaarten tonen een verhoogd dreigingsniveau in België in vergelijking met aangrenzende gebieden in Frankrijk, het Verenigd Koninkrijk, Duitsland en Nederland. Seismische dreigingsanalyses (SDA's) vormen een essentieel hulpmiddel voor ingenieurs om aardbevingsbestendige gebouwen en infrastructuur te ontwerpen. Voorbeelden zijn nationale dreigingskaarten ter ondersteuning van de Europese bouwnorm Eurocode 8 en site-specifieke SDA's voor kritieke infrastructuur zoals nucleaire installaties en SEVESO-geclassificeerde industrieën. Een cruciaal onderdeel van SDA's zijn de grondbewegingsmodellen (GBM's): modellen die de grondbeweging veroorzaakt door aardbevingen koppelen aan magnitude, epicentrale afstand en eventueel andere bron-, traject- of site-eigenschappen. Sterke variaties in grondbeweging worden wereldwijd waargenomen, voornamelijk door verschillen in dempingseigenschappen van de aardkorst. Er zijn echter zeer weinig GBM's beschikbaar voor intraplaatgebieden en geen enkele specifiek voor België. Als gevolg daarvan moesten SDA's in België tot nu toe gebruikmaken van GBM's die voor andere gebieden in de wereld zijn ontwikkeld. Hoewel de selectie van GBM's de afgelopen jaren verfijnder is geworden, is hun validiteit voor onze regio's niet getest en blijft hun weging subjectief. Aangezien in probabilistische SDA de grondbewegingstak van de *logic tree* één van de belangrijkste bijdragen levert aan de onzekerheid, bestaat er duidelijk een nood aan grondbewegingsgegevens uit regio's met lage seismische activiteit.

Grondbewegingsdatabanken zijn essentieel voor de ontwikkeling van GBM's. In de afgelopen twee decennia zijn verschillende internationale initiatieven opgezet om *strong-motion*-gegevens te verzamelen, zoals het Amerikaanse *Next Generation Attenuation* (NGA)-project en de opvolgers NGA-West en NGA-East, de KiK-net-database in Japan, de ITACA-database in Italië, de RESORCE-database voor Europa en het Midden-Oosten, en de wereldwijde *Engineering Strong Motion*-database. Deze databanken bevatten voornamelijk gegevens uit de meest actieve seismische regio's, waar aardbevingen talrijker zijn. Een groot aantal GBM's werd uit deze databanken afgeleid. Daarentegen zijn intraplaatgebieden, met hun veel lagere seismische activiteit, sterk ondervertegenwoordigd. Hoewel het merendeel van de waarnemingen in deze gebieden zwakke grondbewegingen betreft van aardbevingen met magnitudes beneden het bereik dat relevant is voor SDA ($M \geq \sim 4,5$), hebben recente succesvolle projecten in Frankrijk, Zwitserland en Australië aangetoond dat het niet alleen haalbaar, maar ook waardevol is om dergelijke studies uit te voeren, en dus ook in België.

1.7. Doelstellingen

Bovenstaande overwegingen vormden de aanleiding voor het opzetten van een specifiek project, BELSHAKE, dat tot doel heeft een kennislacune en een tekort aan gegevensverzameling op het vlak

van groundbeweging door aardbevingen te overbruggen. De momenteel beschikbare seismische gegevens in België worden voornamelijk gebruikt om regionale aardbevingen te detecteren en te lokaliseren, en om hun belangrijkste bronkenmerken (zoals haarddiepte, lokale magnitude en haardmechanisme) te bepalen. Een systematische inventarisatie van deze gegevens ten behoeve van groundbewegingsmodellering werd echter nog niet uitgevoerd. De belangrijkste doelstellingen van het project zijn tweeledig: (1) het opbouwen van een databank met geregistreerde groundbewegingen door aardbevingen in België en omliggende regio's; (2) het ontwikkelen van de capaciteit om groundbeweging door aardbevingen in België te modelleren op basis van deze databank. Dit zal het mogelijk maken om de validiteit van bestaande GBM's in België te evalueren en uiteindelijk een model te ontwikkelen dat specifiek is voor ons land. De gebruikte methodologieën zijn goed ingeburgerd, maar zijn in de Belgische context slechts gedeeltelijk toegepast. Zowel het thema als de methodes sluiten aan bij de internationale *state of the art*.

1.8. Resultaten

Het belangrijkste resultaat van het BELSHAKE-project is de ontwikkeling van een nieuwe databank met groundbewegingen door aardbevingen in België en omliggende regio's, met name de BELSHAKE-databank. Deze databank is gebaseerd op digitale golfvormgegevens vanaf 1985 en bevat momenteel ongeveer 6400 registraties van 327 tektonische en 17 geïnduceerde aardbevingen met $M \geq 2$. Er werden aanzienlijke inspanningen geleverd om ervoor te zorgen dat zowel de golfvormgegevens, de metadata als de afgeleide intensiteitsmaten (IM's) voldoen aan de *best practices* van internationale groundbewegingsdatabanken. Alle golfvormgegevens werden visueel gecontroleerd, en problemen werden gecorrigeerd of gemarkeerd. Een grote uitdaging vormde de reconstructie van ontbrekende instrumentresponsgegevens voor oudere registraties – informatie die noodzakelijk is om de geregistreerde groundbeweging om te zetten naar fysieke eenheden en instrumenteffecten te corrigeren. Verschillende methoden werden toegepast en hun validiteit werd op verschillende manieren geëvalueerd. Registraties waarvoor de instrumentrespons onbetrouwbaar bleek, werden in de databank gemarkeerd zodat ze niet meer in volgende stappen gebruikt werden. Alle betrouwbare registraties werden vervolgens verwerkt met een semi-geautomatiseerde, uniforme *workflow*. De verwerkingsstappen en hun volgorde werden licht aangepast op basis van schema's uit gevestigde groundbewegingsdatabanken. Vervolgens werden maximaal 109 intensiteitsmaten berekend, wat resulteerde in meer dan 120.000 registratie–component–tijdvenster combinaties. Verder bepaalden we de momentmagnitudes van 294 aardbevingen in de databank en controleerden we de betrouwbaarheid ervan door verschillende methoden toe te passen en door vergelijking met andere aardbevingscatalogi. Er werden verschillende consistentiecontroles uitgevoerd om de kwaliteit van de IM's te garanderen, waaronder analyse van componentverhoudingen, residuenanalyse ten opzichte van een generiek GBM, vergelijking van stations op dezelfde locatie en vergelijking met gemeenschappelijke aardbevingen in de Franse RESIF/EPOS-France-database. Afwijkende IM's werden geanalyseerd en waar nodig gecorrigeerd of verwijderd. De uiteindelijke residuen vertonen geen waarneembare trend met afstand of magnitude en liggen binnen een smal bereik dat vergelijkbaar is met of zelfs kleiner is dan dat van de Franse databank. De BELSHAKE-databank heeft haar waarde al bewezen: ze maakte een herkalibratie van de Belgische lokale-magnitudeschaal mogelijk, uitgevoerd parallel aan dit project. Dit resulteerde in nieuwe inzichten op het vlak van geometrische spreiding en trajectduur – belangrijke resultaten voor het project.

In het tweede deel van het project analyseerden we eerst de anelastische damping van seismische golven in België via de hogefrequentie-dempingsfactor κ , die we bepaalden voor alle registraties in de databank. Analyse van de κ -afstandrelatie met verschillende methoden maakte het mogelijk om κ op te splitsen in een site-specifieke component (κ_0) en een regionale gradiënt (κ_r) in vier geologische domeinen. Onze resultaten tonen dat de variaties in κ_r relatief beperkt zijn, met een gemiddelde dat overeenkomt met een schijnbare (frequentie-onafhankelijke) Q -factor van ongeveer 1750 – wat bevestigt dat seismische damping in België relatief laag is. De vergelijking van site-specifieke κ_0 -waarden met V_{S30} , de gemiddelde schuifgolfsnelheid in de bovenste 30 m, toont relatief constante waarden over een breed bereik voor stations op rotsondergrond. Dit geeft aan dat gesteente met hoge V_{S30} in België niet de lage κ_0 -waarden vertoont die typisch zijn voor hard gesteente in bijvoorbeeld het oosten van Noord-Amerika. Vervolgens evalueerden we de *goodness-of-fit* van meer dan 20 gepubliceerde GBM's ten opzichte van de BELSHAKE-database, met behulp van meerdere statistische maatstaven. Hoewel geen enkel model consequent het beste presteert, vertonen meerdere modellen een goede en stabiele performantie. Een interessant en verrassend resultaat is dat de lage-dempingsversies van NGA-West-modellen voor Californië – een plaatrandgebied – beter aansluiten bij de Belgische gegevens dan de NGA-East-modellen, ontwikkeld voor de intraplaatregio in het oosten van Noord-Amerika. Dit geldt zowel voor absolute waarden als voor de spectrale vorm. Daaropvolgend pasten we de eenvoudige *Referenced Empirical Approach* toe om enkele van de geteste GBM's aan te passen aan de Belgische context. Onze analyses tonen aan dat deze methode voorzichtig moet worden toegepast: enkel modellen die slechts kleine aanpassingen vereisen en waarvan de spectrale vorm niet te sterk afwijkt van de waarnemingen, komen in aanmerking. Daarnaast moet worden geverifieerd dat de residuen geen trend vertonen met magnitude om een vertekening voor hogere magnitudes te vermijden. Desondanks konden drie modellen betrouwbaar worden aangepast. Het meest veelbelovende model dat de beste overeenkomst toont met de BELSHAKE-database is een stochastisch model ontwikkeld voor het Verenigd Koninkrijk. Bovendien konden dankzij internationale gegevensuitwisseling factoren bepaald worden voor de kalibratie van een pan-Europees GBM, met een methodologie die buiten het bereik van het BELSHAKE-project lag. Ten slotte implementeerden we twee methoden, EGF en EXSIM, om grondbewegingen door aardbevingen met hogere magnitudes te simuleren. Als demonstratie simuleerden we realistische grondbewegingen voor de grootste aardbeving in de databank: de aardbeving van Roermond in 1992. Deze toepassing zou niet mogelijk zijn zonder andere projectresultaten, zoals de traject- en sitecomponenten van κ , V_{S30} -waarden voor Belgische stations en de nieuw afgeleide modellen voor geometrische spreiding en trajectduur. Hiermee hebben we de basis gelegd voor stochastische simulatie van accelerogrammen voor hypothetische aardbevingen met hoge magnitude die overeenkomen met de gemiddelde bron-, traject- en sitekenmerken in en rond België.

1.9. Conclusies

De beschikbare seismische gegevens in België zijn tot nu toe onderbenut voor ingenieurs-seismologische toepassingen. In het BELSHAKE-project hebben we de eerste grondbewegingsdatabank ontwikkeld die specifiek voor dit doel dient. Dankzij de kwaliteitsgecontroleerde registraties, geïntegreerde instrumentrespons en uitgebreide metadata vormt de BELSHAKE-databank een waardevolle en hoogwaardige bron voor grondbeweging door aardbevingen in België, zoals blijkt uit de kleine onzekerheden op locaties en magnitudes en de lage residuen. Hoewel het magnitudebereik relatief beperkt is (grotendeels $M \leq 4$), bevat de databank

belangrijke informatie over de bron-, traject- en sitekenmerken van grondbeweging in onze regio. Ze vult bestaande databanken aan door de dekking van gebieden met lagere seismische activiteit en van lage magnitudes te vergroten, en zal als een referentie dienen voor tal van andere seismologische toepassingen, zoals de herkalibratie van de Belgische lokale-magnitudeschaal die parallel aan dit project werd uitgevoerd.

Met behulp van de BELSHAKE-databank hebben we zowel de geometrische spreiding als de anelastische demping in België gedetailleerder dan ooit gekarakteriseerd. De databank maakte het mogelijk om te evalueren welke gepubliceerde grondbewegingsmodellen het best overeenkomen met de waarnemingen, en enkele hiervan konden worden gekalibreerd. Voor het eerst beschikken we nu over GBMs die specifiek op België zijn afgestemd op basis van lokale gegevens. Dit zal leiden tot beter onderbouwde en datagedreven GBM-selectie in seismische dreigingsanalyses. Daarnaast hebben we de capaciteit ontwikkeld om grondbewegingen door aardbevingen met hogere magnitudes te simuleren. Deze ontwikkelingen vormen een stevige basis voor verdere vooruitgang op het vlak van grondbewegingsmodellering in België. Onze resultaten zullen bijzonder waardevol zijn voor toekomstige SDA's in België, zoals nodig voor de herziening van Eurocode 8, alsook voor de verlenging van bestaande of de locatiekeuze van nieuwe nucleaire installaties.

1.10. Trefwoorden

Aardbevingen, grondbewegingsmodel, database, seismische dreiging, seismische demping

SUMMARY (FRENCH)

1.11. 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 épacentrale, 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'accélération 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.

1.12. 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.

1.13. 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.

1.14. 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.

1.15. Mots clefs

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