



Article

Évaluation des risques sismiques basée sur des scénarios pour Reykjavik Zone de la capitale

Bjarni Bessason ^{1,*}, Rajesh Rupakhety ¹ et Jón Örvar Bjarnason ²

¹ Faculté de génie civil et environnemental, Université d'Islande, 107 Reykjavik, Islande ; rajesh@hi.is

² Assurance contre les catastrophes naturelles d'Islande, 201 Kópavogur, Islande ; jon@nti.is * Correspondance : bb@hi.is

Résumé : Environ les deux tiers de la population islandaise vivent dans la région de la capitale Reykjavik (RCA), proche des volcans actifs et des zones sismiques. Au cours de la période 1900-2019, 53 tremblements de terre de $M_w \geq 5,0$ ont frappé ces zones. Les deux événements les plus importants survenus dans la péninsule de Reykjanes, $M_w 6,36$ et $M_w 6,12$, se sont produits respectivement en 1929 et 1968. Les deux événements se sont déroulés à moins de 20 km de la périphérie du RCA. À la fin de l'année 2020, la sismicité sur la péninsule a considérablement augmenté en raison de l'intrusion magmatique et de l'activité volcanique, qui ont jusqu'à présent entraîné trois éruptions, en 2021, 2022 et 2023, et six tremblements de terre de $M_w \geq 5,0$. Sur la base des données historiques et géologiques, l'activité en cours constitue probablement la phase initiale d'une période active à venir qui pourrait se poursuivre pendant plusieurs décennies et pourrait potentiellement déclencher des tremblements de terre plus importants que ceux de 1929 et 1968. Plus à l'est, dans le sud de l'Islande. Zone, deux tremblements de terre de $M_w 6,52$ et $6,44$ ont frappé en juin 2000, et en mai 2008, un séisme de $M_w 6,31$ s'est produit. Dans les deux cas, environ 5 000 bâtiments ont été touchés. Les données sur les pertes d'assurance résultant de ces événements ont été utilisées pour développer des modèles empiriques de vulnérabilité pour les immeubles de faible hauteur. Dans cette étude, les données de perte sont utilisées pour calibrer les modèles de vulnérabilité sismique en termes de distance source-site. Pour un scénario d'ampleur donnée, cela fournit une représentation plus simple de la vulnérabilité sismique et est utile pour la planification des urgences et la gestion des catastrophes. Ces modèles sont également utilisés pour calculer différents types de cartes de risques de scénarios pour le RCA pour une répétition du tremblement de terre de 1929.

Mots-clés : préparation aux catastrophes ; planification d'urgence ; vulnérabilité sismique ; fragilité sismique ; cartes des risques



Référence : Bessason, B. ; Rupakhety, R. ; Bjarnason, J.Ö. Basé sur un scénario d'évaluation des risques sismiques pour le

Région de la capitale Reykjavik. *Bâtiments* 2023, 13, 2919. <https://doi.org/10.3390/buildings13122919>

Rédacteurs académiques : Xavier Romão et Annalisa Greco

Reçu : 29 septembre 2023

Révisé : 14 novembre 2023

Accepté : 20 novembre 2023

Publié : 23 novembre 2023



Copyright : © 2023 par les auteurs.

Licencié MDPI, Bâle, Suisse.

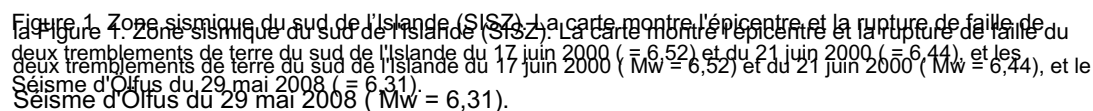
Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons

Licence d'attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

La résilience sismique est cruciale pour les communautés et les infrastructures exposées aux risques sismiques. Elle est définie comme la capacité d'un système à résister à des tremblements de terre destructeurs, à s'y adapter et à s'en remettre. Le renforcement des infrastructures, l'amélioration des codes du bâtiment, l'amélioration de la préparation aux situations d'urgence et l'augmentation du niveau d'éducation et de connaissances peuvent collectivement réduire les conséquences potentielles des événements sismiques. Pour formuler des stratégies et des politiques visant à accroître la résilience sismique, il est essentiel de connaître le risque sismique pour la communauté en question [1–3]. Cette étude se concentre sur une évaluation de la vulnérabilité et une évaluation du risque sismique basée sur des scénarios pour la région de la capitale Reykjavik (RCA) en Islande. Un séisme passé connu de $M_w 6,36$ est utilisé comme événement de scénario, représentant l'un des scénarios les plus dommageables pour la RCA parmi tous les tremblements de terre connus dans son voisinage.

Outre les modèles d'aléa sismique et d'exposition, la vulnérabilité sismique des structures et des infrastructures est un facteur clé dans l'évaluation du risque sismique. Les modèles de vulnérabilité peuvent être basés sur (1) des méthodes basées sur le jugement [4,5] ; (2) simulations analytiques et expériences [6,7] ; (3) des méthodes empiriques utilisant les données sur les pertes provenant d'enquêtes post-séisme [8–10] ; et (4) des méthodes hybrides avec des combinaisons de deux ou plusieurs de ces méthodes. Toutes ces méthodes ont leurs avantages et leurs inconvénients. Lorsqu'il existe des ensembles de données locales sur les pertes, ils offrent toujours des informations précieuses dont on peut tirer des leçons et les utiliser pour prédire les pertes lors d'événements futurs similaires.

[illegible]

Les **Risques sismiques dans la péninsule de Reykjanes** sont des réclamations d'assurance. Deux ensembles de données sur les pertes ont été créés et nommés les ensembles de données de 2000 et 2008. Ces ensembles de données ont, dans une certaine mesure, ont été analysés et des modèles empiriques avancés de vulnérabilité ont été développés indépendamment pour chaque ensemble de données [13,16,17]. Dans toutes ces études, l'accélération maximale du sol (PGA) a été utilisé comme mesure d'intensité (IM) en utilisant une prédiction locale du mouvement du sol modèle (GMPM) rapporté dans [18]. Besson et coll. [17] signalent des différences pour un même bâtiment typologies dans les modèles de vulnérabilité dérivés des deux ensembles de données et suggèrent que le modèle calibré à partir de l'ensemble de données de 2000 est utilisé pour les événements dans la plage Mw de 6,4 à 6,6, tandis que celui basé sur l'ensemble de données de 2008 est utilisé pour les séismes dans la plage Mw de 6,2 à 6,4. Le scénario L'événement de Mw6,36 est juste en dessous de la plage de magnitude couverte par l'ensemble de données de 2000, mais dans les limites la plage couverte par l'ensemble de données de 2008.

$$PGA = fM_w \cdot RJB \cdot S \quad (1)$$

où M_w est la grandeur du moment. RJB est la distance Joyner-Boore [19], qui est la distance du site à la projection superficielle du plan de rupture. Pour une faille verticale plan comme lors des séismes de juin 2000 et 2008, c'est la distance jusqu'au trace superficielle du défaut causal (voir Figure 1). Enfin, S est un facteur de site qui est pris comme 0 pour les sites rocheux et 1 pour les sols durs. Basé sur des cartes géologiques de l'Islande Institut d'Histoire Naturelle [20], toutes les principales agglomérations et presque toutes les zones bâties. Les sites touchés par le séisme de mai 2008 sont des sites rocheux ou laveux (voir aussi [21]). Pour les personnes concernées zones en juin 2000, la plupart des chantiers de construction sont également des sites de roches ou de lave, bien que certains

les zones le long de la côte, principalement à l'est de la rivière Thjórsá et au sud de la ville de Hella (voir Figure 1), contiennent des sédiments et peuvent être classées comme sites à sols durs [20]. Par souci de simplicité, les conditions du site rocheux sont prises en compte pour tous les chantiers de construction de cette étude. Cela signifie que le PGA estimé sur chaque site est uniquement fonction de M_w et de RJB (voir l'équation (1)). Par conséquent, pour un M_w fixe et $S = 0$ (site rocheux), le PGA et le RJB sont liés et entièrement corrélés en utilisant le GMPM.

Alors que les modèles de vulnérabilité basés sur l'intensité des secousses du sol, tels que le PGA, sont plus couramment utilisés dans la littérature en raison de leur application dans les études probabilistes des risques, les études basées sur des scénarios peuvent bénéficier de modèles alternatifs. Par exemple, pour un scénario d'ampleur donnée, des modèles de vulnérabilité basés sur la distance source-site peuvent être utiles. Ils sont plus faciles à comprendre car ils concernent directement la zone de dommage attendue. Dans les zones caractérisées par des tremblements de terre de taille caractéristique similaire, les modèles de vulnérabilité basés sur la distance source-site conviennent à une évaluation des risques basée sur des scénarios.

Bien que ce paramètre ne soit pas, à proprement parler, une mesure de l'intensité du mouvement du sol, il peut être considéré comme un indicateur d'une magnitude donnée.

Le premier objectif principal et nouveauté du présent travail est de calibrer indépendamment les modèles de vulnérabilité pour l'ensemble de données 2000 ($M_w 6.5$) et l'ensemble de données 2008 ($M_w 6.3$) en fonction de RJB. Les avantages de l'utilisation du RJB au lieu du PGA sont doubles. Premièrement, dans la planification d'urgence, il est plus facile pour les parties prenantes, les responsables de la protection civile, les décideurs et les politiciens ayant une expérience technique limitée et/ou en ingénierie sismique de comprendre et d'utiliser les courbes de vulnérabilité et de fragilité en fonction de la distance plutôt qu'en fonction du PGA ou du PGA. une autre mesure d'intensité compliquée. Deuxièmement, les GMPM qui estiment les mesures de l'intensité du mouvement du sol ont tendance à évoluer avec le temps avec de nouvelles données et sont associés à des incertitudes importantes. À cet égard, l'utilisation d'une mesure d'intensité médiane basée sur un GMPM pour calibrer les modèles de vulnérabilité ne parvient pas à capturer cette incertitude inhérente. En revanche, pour un environnement tectonique bien compris, avec des scénarios sismiques fiables, la distance source-site est relativement bien définie. Elle est néanmoins associée à certaines incertitudes sur la durée de rupture et la localisation de l'épicentre sur la faille, mais les mêmes incertitudes sont également associées au PGA. De telles incertitudes dans la modélisation des scénarios peuvent être prises en compte en définissant différents scénarios potentiels. Cette approche rend également le modèle de vulnérabilité indépendant d'un GMPM. Malgré la présentation simple suggérée de la variable explicative, le calage du modèle repose néanmoins sur une modélisation statistique avancée, telle que celle rapportée par [13,17].

Le deuxième nouvel objectif de cette étude est de préparer différents types de cartes de risques de scénarios pour le RCA. Le scénario envisagé est une répétition du tremblement de terre de 1929 dans la péninsule de Reykjanes. Ce séisme a probablement été le scénario le plus dommageable pour les bâtiments de la RCA de tous les tremblements de terre connus dans son voisinage. Compte tenu de l'activité volcanique et sismique accrue et continue dans la péninsule de Reykjanes, comme décrit dans la section suivante, ces cartes de risques peuvent être utilisées pour améliorer la résilience sismique de la région de la capitale de Reykjavik (RCA).

La section suivante traite des risques sismiques pour la RCA et présente les données d'exposition pour les bâtiments résidentiels. Vient ensuite une section décrivant les ensembles de données sur les pertes de 2000 et 2008, ainsi que le contexte théorique du modèle empirique de vulnérabilité. La section finale englobe les résultats et la discussion, divisée en deux parties. La première partie présente des courbes de vulnérabilité et de fragilité calibrées en fonction de la distance Joyner-Boore. La deuxième partie se concentre sur la présentation de cartes de risques basées sur des scénarios pour la RCA.

2. Risques sismiques et données d'exposition

2.1. Risques sismiques dans la péninsule de Reykjanes

Environ les deux tiers de la population islandaise vivent dans la région de la capitale Reykjavik (RCA). La zone de la capitale se trouve dans la partie nord-est de la péninsule de Reykjanes, qui est une zone sismique et volcanique active (Figure 2) [22]. Dans un nouveau catalogue sismique harmonisé

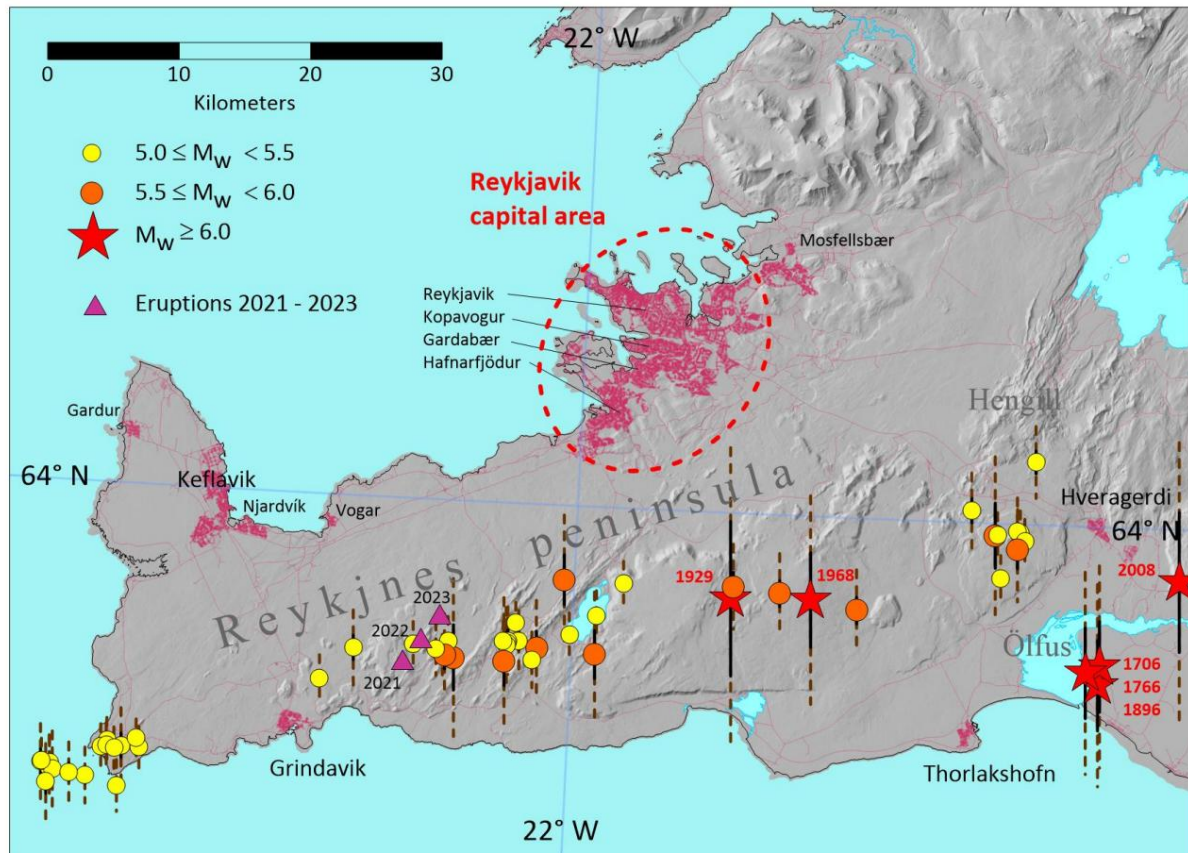
[illegible]

Figure 2. Répartition des Reykjanes. Les lignes fines rouges représentent le système coulé et les lignes rouges plus épaisses peuvent représenter utilisé pour identifier les colonies et les villes. Séismes instrumentaux enregistrés entre 1900 et 1900 pour identifier les colonies et les villes. Séismes instrumentaux enregistrés entre 1900 et 2019 avec ≥ 5.0 et trois tremblements de terre historiques de 1700 à 1900 avec ≥ 6.0 dans l'Olufus avec $M_w \geq 5.0$ et trois tremblements de terre historiques de 1700 à 1900 avec $M_w \geq 6.0$ dans la région d'Olufus la région est affichée [12]. Les événements les plus importants (étoiles rouges) sont marqués de l'année où ils se sont produits. Les noirs sont affichés [12]. Les événements les plus importants (étoiles rouges) sont marqués de l'année où ils se sont produits. Les lignes noires les lignes indiquent une rupture de faille de surface calculée et les lignes marron pointillées la rupture souterraine indiquent une rupture de faille de surface calculée et les lignes brunes pointillées la rupture souterraine basée sur le modèle de rupture de [24]. Les éruptions de la période 2021 à 2023 sont marquées en violet sur le modèle de rupture de [24]. Les éruptions de la période 2021 à 2023 sont marquées par des triangles violets et année.

À la fin de l'année 2020, l'activité sismique a considérablement augmenté dans la partie ouest du pays. À la fin de l'année 2020, l'activité sismique a considérablement augmenté dans la partie ouest du pays. Péninsule de Reykjanes en raison de l'intrusion magmatique et de l'activité volcanique, qui a jusqu'à présent la péninsule de Reykjanes en raison de l'intrusion magmatique et de l'activité volcanique, qui a jusqu'à présent a donné lieu à trois éruptions. La première éruption a débuté le 19 mars 2021 et a duré quelques mois. La deuxième éruption, qui a débuté le 3 août 2022, a été relativement brève,

L'événement le plus important a été Mw = 5.6 le 24 février 2021 [25], historique et secourus ont également été clairement ressenties dans le RCA. Néanmoins, ces événements n'ont donné lieu qu'à des informations géologiques indiquant que l'activité volcanique naissante et l'activité sismique associée des dommages mineurs liés à des pertes esthétiques et non structurales (les objets tombant sur les sols, dans la région, pourraient durer plusieurs décennies encore [26]. La sismicité de la période etc.). Au total, 25 réclamations d'assurance ont été versées par l'assurance contre les catastrophes naturelles avant que les éruptions ne provoquent un malaise parmi les habitants des petites villes les plus proches.

L'Islande [27], qui est une institution publique qui supervise l'assurance des bâtiments et des éruptions, principalement à Grindavik, qui en était la plus proche, mais aussi à Vogar et Njardvík. Le

d'autres propriétés en Islande contre les catastrophes naturelles comme les tremblements de terre. En Islande, les véritables secourus ont également été clairement ressenties au sein de la RCA. Néanmoins, ces événements n'ont fait qu'engendrer le strictement est tenu sur la liste de tous les types de catastrophes naturelles. Actuellement, les dégâts mineurs liés aux pertes des biens personnels et matériels sont faibles (pas de pertes de personnes ou de biens).

La franchise d'été de 2005 pour la catastrophe naturelle de dommageable donné. Cela signifie que etc.). Au total, 25 réclamations ont été versées par l'assurance contre les catastrophes naturelles avant que les éruptions ne provoquent un malaise parmi les habitants des petites villes les plus proches.

Bien sûr, les pertes des biens personnels et matériels sont faibles (pas de pertes de personnes ou de biens).

En Islande, l'activité sismique et les catastrophes naturelles comme les tremblements de terre. En Islande, tous les biens immobiliers la franchise. L'activité sismique dans la région a le potentiel de déclencher une réaction plus importante et la mobilité à s'assurer contre les catastrophes naturelles. À l'heure actuelle, la franchise est des tremblements de terre dans une gamme de magnitude comme ceux de 1929 et 1968 (voir Figure 2).

~2600 EUR pour chaque propriété pour un événement dommageable donné. Cela signifie que même si les pertes dans les 25 cas ci-dessus étaient mineures, elles étaient néanmoins supérieures à la franchise.

L'activité en cours dans la région pourrait potentiellement déclencher des tremblements de terre tectoniques plus importants dans un avenir proche.

Garðabær inniheldur í sínu nafni borgirnar Garðabær og Garðabæjar (Reykjavík, Kópavogur, Garðabær).

Hafnafjörður et Seltjarnarnes) a une composition assez différente de celle de la masse du bâtiment 2.2. Données d'exposition

dans le SISZ contenu dans les deux ensembles de données (voir section 3.2). Dans la figure 3, les logements du parc immobilier

Les RCA sont classés selon le matériau de construction; le nombre d'étages et le niveau de code.

Hafnafiörður et Seltjarnarnes) a une composition assez différente de celle de la masse du bâtiment. Environ 95 % des logements se trouvent dans des bâtiments en béton ou en béton + autre matériau, dans la SISZ contenue dans les deux jeux de données (voir section 3.2). Dans la figure 3, les logements de type 1, qui ne sont que 1 % des logements, sont situés dans des bâtiments en maçonnerie. Environ 26 % des logements sont classés en RCA en fonction du matériau de construction, du nombre d'étages et du niveau de code.

dans des immeubles de 1 à 2 étages et 56 % dans des immeubles de 3 à 5 étages. Enfin, 62% des logements Environ 95% des logements sont situés dans des bâtiments en béton ou béton+autre matériau.

logements sont situés dans des bâtiments en béton ou béton+autre matériau, sont des bâtiments conçus dans la période de code modéré et de code élevé (voir tableau 1). Alors que seulement 1% des

Le système de résistance aux charges latérales pour la plupart du parc immobilier est constitué de murs porteurs comme dans les

[illegible]

Siez le baume est conservé pendant un petit nombre de mois, il se conserve. Le code suivant, du point de vue chimique, indique la composition du baume.

Les barrières high code se trouvent dans les banlieues des communes les plus proches de la rupture de l'axe élargi au cours

des dernières décennies. Par conséquent, la plupart des bâtiments à code modéré et à code élevé, l'événement du scénario de 1929 (Figure 2). Les immeubles d'habitation sont fréquents dans les nouveaux quartiers se situent

et toutes les classes de délaçages de la figure 3b se retrouvent par contre presque partout (figure 2). Les

et toutes les classes d'étages de la figure 5b se retrouvent par contre presque partout (figure 2). Les immeubles d'habitation sont courants dans les nouveaux quartiers et dans toutes les classes d'étages.

La figure 3b se retrouve en revanche un peu partout au sein du RCA.

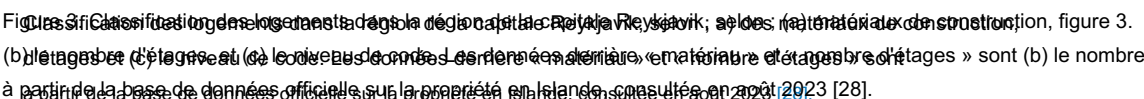


Tableau 1. Statut des codes de conception sismique en Islande pour différentes périodes de construction.

Statut	Description	Commentaire	Période
CDN	Pas de code	Pas de code de conception sismique	<1958
CDL	Low-code	Première génération de codes sismiques	1958-1975
MDP	Code modéré	Deuxième génération de codes sismiques	1976-2001
CDH	Code élevé	Codes sismiques de dernière génération	≥2002

3. Données sur la perte et modèle empirique de vulnérabilité

3.1. Données de perte

La loi islandaise impose de souscrire une assurance contre les événements naturels destructeurs. Cela inclut des événements comme les tremblements de terre, les glissements de terrain, les avalanches, les inondations, etc. fait partie des conditions de l'assurance incendie. Si une propriété possède une assurance incendie, elle bénéficie également assurance catastrophe. L'assurance est gérée par l'Assurance des catastrophes naturelles d'Islande. (NCI) [27]. Après les tremblements de terre de juin 2000, le coût de réparation des propriétés endommagées a augmenté estimé par des évaluateurs qualifiés pour répondre aux réclamations d'assurance. La zone touchée est une zone agricole région avec des fermes, des colonies, des petites villes et toutes les infrastructures d'un pays moderne. société. Les deux événements de juin 2000 se sont produits en seulement quatre jours et, par conséquent, Les dommages observés peuvent inclure des dommages accumulés provenant des deux événements. La distance entre la rupture de faille des événements du 17 juin et du 21 juin est d'environ 16 km (Figure 1). Le l'atténuation de la propagation des ondes est élevée en Islande en raison d'un terrain géologiquement jeune et fissuré substrat rocheux volcanique et champs de lave en couches. Dans [13], il a été avancé que presque tous les dommages les bâtiments de juin 2000 n'ont été touchés que par le tremblement de terre le plus proche du bâtiment en question. Seuls très peu de bâtiments se trouvaient dans la zone médiane, à une distance similaire les uns des autres. faute, et donc affectés « de manière égale » par les deux événements (Figure 1). Dans l'ensemble de données de 2000, chaque l'unité de perte fait référence à un « bâtiment » où un bâtiment est défini à partir d'une adresse postale (voir [16] pour plus de détails).

Après le tremblement de terre de mai 2008, des méthodes similaires à celles utilisées pour les tremblements de terre de 2000 ont été appliquées. utilisé pour évaluer le coût des réparations afin d'établir l'ensemble de données sur les pertes de 2008. Dans l'ensemble de données de 2008, la perte l'unité est une « habitation ». En 2000 et 2008, la franchise d'assurance était faible (650 euros par personne). logement). Cette faible valeur a incité tous les propriétaires à signaler les dommages causés à leurs propriétés pour recevoir le remboursement de l'assurance. C'est la principale raison qui justifie l'hypothèse selon laquelle à la fois le Les ensembles de données de 2000 et 2008 sont complets et incluent tous les bâtiments touchés dans la région. (PGA > 0,05 g), ce qui est rare dans d'autres études [29]. La franchise est désormais porté à ~2600 EUR par logement.

Les deux ensembles de données couvrent les estimations des pertes pour les éléments structurels et non structurels. éléments. Le terme « éléments non structurels » comprend le revêtement de sol, les revêtements de sol, les agencements et systèmes techniques (installations électriques, plomberie, etc.). Dommages au contenu du bâtiment, c'est-à-dire que les articles ménagers en vrac comme les meubles, les téléviseurs, les ordinateurs, etc. ne sont pas inclus. Dans cette étude, les modèles de vulnérabilité présentés sont évalués pour les pertes combinées de les dommages structurels et non structurels indiqués dans les ensembles de données. Un facteur de dommage, DF, est calculé pour chaque unité de bâtiment, qui est définie comme :

$$DF = \frac{\text{Coût de réparation estimé}}{\text{Valeur d'assurance incendie}} = \frac{ERC}{FIV} \tag{2}$$

où ERC est le coût de réparation estimé combiné. La valeur d'assurance incendie (FIV) est obtenue à partir d'une base de données immobilière officielle. Le FIV est estimé comme le remplacement déprécié valeur (DRV) majorée des frais de démontage et de transport des débris. Le démantèlement et le coût du transport est pris à 12% du DRV. Le DRV est basé sur l'âge, la construction matériel, et état général. Le FIV est utilisé par NCI pour définir le retour sur investissement maximum qu'un propriétaire d'immeuble peut recevoir pour un logement/immeuble présentant un « dommage total » ou un « perte » (DF = 1). En pratique, des dommages équivalents à la « perte totale » ont été attribués à la plupart des bâtiments qui ont subi un coût de réparation estimé à plus de 70 % de leur valeur FIV en

l'ensemble de données de 2000. Dans l'ensemble de données de 2008, la perte totale a été estimée au cas par cas pour les logements dont la perte est estimée entre 50 et 70 % de leur FIV.

3.2. Construire une taxonomie des données sur les pertes

Le registre de la propriété en Islande [28] maintient une base de données détaillée sur la propriété de toutes les unités immobilières en Islande. Il contient des informations sur le matériau de construction, l'année de construction, le nombre d'étages, l'usage (résidentiel, tertiaire, industriel, etc.), la superficie, l'adresse, les coordonnées GPS, la valeur d'assurance incendie, etc. Il ne comprend pas d'informations sur le système de support des charges latérales ou du système structurel principal, ni sur les conditions du site (substrat rocheux, sol, etc.). Dans cette étude, la taxonomie GEM a été utilisée pour classer toutes les unités de construction dans les ensembles de données [30]. Seuls les immeubles résidentiels ont été pris en compte. L'ensemble de données de 2000 est un ensemble de bâtiments par bâtiment, tandis que celui de 2008 est un ensemble de logements par logement. La plupart des bâtiments dans les ensembles de données ont un ou deux étages et, dans de tels cas, les unités de bâtiment et les unités d'habitation sont les mêmes.

Dans l'ensemble de données de 2000, 54 % des bâtiments résidentiels étaient construits en béton (C), presque tous coulés sur place (CIP) ; 37 % étaient des bâtiments en bois (W) en bois clair (WLI) ; 9,3 % de bâtiments en maçonnerie non armée (MUR + CBH + MOC) construits avant 1976, date à laquelle les codes sismiques ont été mis en œuvre pour la première fois en Islande ; et le reste, soit 0,3 %, utilisait d'autres matériaux de construction. Seuls 23 bâtiments, pour la plupart en bois, ont été construits avant 1900 et le bâtiment le plus ancien a été construit en 1875. Concernant la hauteur, 68 % des bâtiments étaient à un étage, 23 % à deux étages, 7,9 % à trois étages et 0,3 % quatre étages. Aucun bâtiment n'était plus haut. Dans l'ensemble de données de 2008, où toutes les pertes concernent les logements, 45 % d'entre elles concernaient des bâtiments en béton, 48 % des bâtiments en bois et 7,6 % des bâtiments en maçonnerie. De plus, 74 % des logements étaient situés dans des immeubles à un étage, 19 % dans des immeubles à deux étages, 5,9 % dans des immeubles à trois étages et 0,5 % dans des immeubles à quatre étages. Dans l'ensemble de données de 2008, 19 logements se trouvaient dans des bâtiments construits avant 1900, et le plus ancien a été construit en 1875.

Étant donné que seule une faible fraction des bâtiments concernés ont trois étages ou plus dans les deux ensembles de données, ils ont été exclus de la modélisation et les modèles évalués ne prennent donc en compte que les bâtiments d'un à deux étages. Ces bâtiments ont été combinés et la classe marquée HBET : 1,2 selon la taxonomie [30].

Le système de résistance aux charges latérales pour presque tous les bâtiments des deux ensembles de données sont des murs structurels. Basé sur la taxonomie GEM, LWAL est donc utilisé pour identifier le système structurel. Dans les deux ensembles de données, les bâtiments en maçonnerie sont construits à partir de blocs de béton creux non armés utilisant de la pierre ponce légère comme agrégat principal (roche volcanique à haute porosité). Les fondations et les dalles inférieures des bâtiments en bois et en maçonnerie sont généralement en béton armé. Les bâtiments à ossature de béton avec des remplissages en pierre ou en brique, courants en Europe du Sud, n'existent pas en Islande. Pour plus de détails sur les caractéristiques du bâtiment, voir [17].

Crowley et coll. [31] ont classé l'état des codes de conception sismique dans différents pays européens, dont l'Islande, en quatre catégories basées sur la période de construction (tableau 1).

Dans [17], il a été conclu que les bâtiments sans code et à faible code (CDN + CDL) pouvaient être combinés en une seule classe, et les bâtiments à code modéré et à code élevé (CDM + CDH) en une seule classe. Cependant, dans le jeu de données de 2000, aucun bâtiment n'appartient à la période high-code, qui a débuté en 2002. Une seule classe, CDN + CDL, est disponible pour les bâtiments en maçonnerie, la plupart d'entre eux, soit 98 %, ayant été construits avant 1976. Les 2 % restants n'ont pas été utilisés dans l'étalonnage du modèle. Le tableau 2 résume la façon dont les unités de bâtiment dans les deux ensembles de données sur les pertes sont réparties dans les cinq typologies de bâtiments utilisées dans cette étude.

Tableau 2. Classification des immeubles d'habitation touchés par les séismes de juin 2000 et mai 2008.

Court Nom	Taxonomie du bâtiment GEM	Ensemble de données 2000		Ensemble de données 2008	
		Nombre	(%)	Nombre	(%)
C-NL	CR + CIP/LWAL/HBET:2,1/CDN + CDL	1665	35	1112	23
CM ou C-MH	1 CR + CIP/LWAL/HBET:2,1/CDM + CDH	907	19	1003	21
W-NL	W + WLI/LWAL/HBET:2,1/CDN + CDL	692	15	649	14
WM ou W-MH	1 W + WLI/LWAL/HBET:2,1/CDM + CDH	1047	22	1623	34
M-NL	MUR + CBH + MOC/LWAL/HBET:2,1/CDN + CDL	443	9.3	359	7.6
Somme totale		4754	100	4746	100

¹ CM et WM font référence à l'ensemble de données de 2000 puisque cet ensemble de données n'inclut aucun bâtiment à code élevé, tandis que C-MH et W-MH fait référence à l'ensemble de données de 2008.

3.3. Modèle de vulnérabilité

Lors des tremblements de terre de juin 2000 et mai 2008, une forte proportion de bâtiments/habitations dans la zone touchée (PGA > 0,05 g) n'ont eu aucune perte, DF = 0, tandis que les bâtiments avec pertes totales, DF = 1, étaient rares dans les deux ensembles de données. Entre ces extrêmes se trouvent un certain nombre d'unités de construction avec une certaine perte, c'est-à-dire un DF compris entre 0 et 1. Puisque l'ensemble de données de perte comprend « zéro » et « une » valeurs, puis plusieurs valeurs intermédiaires, il est préférable d'utiliser un continu mixte – régression discrète pour modéliser les données, c'est-à-dire des modèles discrets pour couvrir le DF = 0 et le DF = 1 cas, puis régression continue pour les données de perte comprises dans la plage (0, 1). La probabilité bêta la distribution est flexible et peut prendre une large gamme de formes. Il est également délimité dans le intervalle (0, 1) et convient donc pour couvrir la régression continue dans le modèle. Bêta

la distribution a été utilisée dans ACT-13 [4,5] pour modéliser les pertes, où les méthodes basées sur le jugement ont été appliquées. Dans les lignes directrices GEM pour l'évaluation empirique de la vulnérabilité [29], version bêta la régression est mentionnée comme méthode future potentielle. Dans cette étude, où les données incluent un fraction élevée d'incidents sans perte mais seulement un petit nombre de pertes totales, un taux gonflé à zéro Le modèle de régression bêta est bien adapté [32]. Il s'agit d'un modèle de régression bêta amélioré à prendre en compte soin des zéros. La modélisation discrète des pertes totales des bâtiments (DF = 1) est exclue, mais au lieu de cela, le DF de ces bâtiments se voit attribuer une valeur inférieure à 1. Ce modèle a été utilisé plus tôt pour modéliser à la fois l'ensemble de données de 2000 et l'ensemble de données de 2008 en utilisant le PGA comme intensité mesurer dans un modèle à cinq paramètres pour chaque typologie de bâtiment [13,17].

Un processus de régression en deux étapes est utilisé pour construire le modèle de vulnérabilité. Ce L'approche est expliquée schématiquement dans la figure 4 en utilisant le PGA comme mesure d'intensité et les données de perte de l'ensemble de données 2000 pour la classe C-NL (1665 points de données, voir tableau 2). Le PGA peut être remplacé par toute autre mesure d'intensité souhaitée ou son proxy, comme par exemple, la distance Joyner – Boore, RJB, comme dans la section 4. Dans la figure 4a, les données de perte (données brutes) sont montré. Chaque point indique le DF estimé basé sur l'équation (2) pour le bâtiment donné unité et le PGA calculé sur le site de propriété en question. Dans la figure 4b, les données de perte sont transformées en variables binomiales, c'est-à-dire Y = 0 si DF = 0 et Y = 1 si DF > 0. Les données les points sont instables dans la plage [-0,05, 0,05] pour Y = 0 et dans la plage [0,95, 1,05] pour Y = 1 pour mieux montrer la densité des points de données. Un modèle de régression logistique (LM), qui est un type de modèle linéaire généralisé, est ensuite utilisé pour analyser la relation entre Y et le PGA, c'est-à-dire modéliser la probabilité d'obtenir une perte en fonction du PGA. Le Le modèle logistique pour chaque typologie de bâtiment est donné comme suit :

$$\text{loge} \frac{p}{1 - p} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{PGA} \tag{3}$$

où β_0 et β_1 sont des paramètres de régression et p est la probabilité de subir des pertes (DF> 0) (Figure 4b). Les paramètres du modèle sont calculés à l'aide de la méthode linéaire générale package modèle, glm, dans R [33].

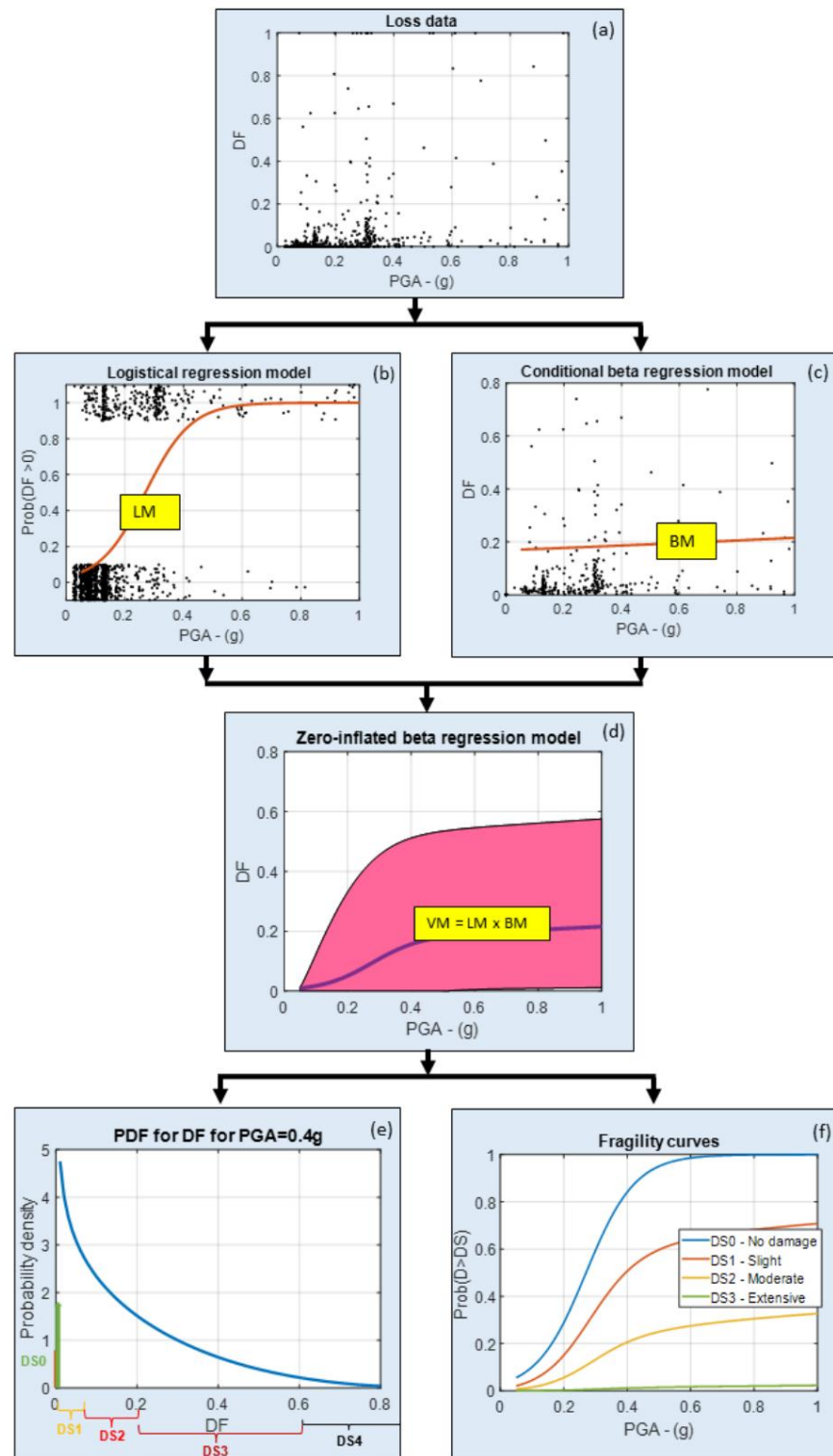


Figure 4. Organigramme expliquant les principales étapes du modèle de régression bêta gonflé à zéro : (a) perte des données ; (b) modèle de régression logistique (LM) ; (c) modèle de régression bêta conditionnelle (BM) ; (d) modèle de vulnérabilité (VM) obtenu en combinant le LM et le BM ; (e) fonction de densité pour le DF à PGA = 0.4g ; (f) courbes de fragilité basées sur les données sélectées des compartiments DF prédéfinis (niveau 3).

Tableau 3. Définitions des états de dommages dans cette étude.

État des dommages	Description	Bacs DF
DS0	Pas de dommage	DF = 0
DS1	Légers dégâts	0,00 < DF ≤ 0,05
DS2	Dommages modérés	0,05 < DF ≤ 0,20
DS3	D'importants dégâts	0,20 < DF ≤ 0,50
DS4	Dommages complets	DF > 0,5

Une régression bêta [34] est effectuée pour les points de données avec un DF > 0 pour modéliser la distribution continue des pertes (Figure 4c). La fonction de densité de probabilité bêta (PDF) est

donné comme suit :

$$f(x; \mu, \gamma) = \frac{\Gamma(\gamma)}{\Gamma(\mu)\Gamma(1-\mu)} x^{\mu-1} (1-x)^{(1-\mu)-1}$$

(4)

où x est la variable aléatoire dans la plage (0, 1) ; μ est la moyenne ; γ la précision ; et $\Gamma(\cdot)$ est la fonction gamma. La moyenne et la précision du PDF bêta sont liées à la prédicteurs linéaires η_1 et η_2 utilisant les fonctions de lien, $g_1(\cdot)$ et $g_2(\cdot)$. Les prédicteurs linéaires sont un fonction de la mesure de l'intensité des secousses du sol ou de son substitut. Les fonctions de lien doivent être strictement monotone et différentiable deux fois. La fonction de lien logit a été adoptée pour μ , et la fonction de lien log pour γ :

$$g_1(\mu) = \text{logit}(\mu) = \text{journal} \frac{\mu}{1-\mu} = \eta_1$$

(5)

$$g_2(\gamma) = \log(\gamma) = \eta_2$$

(6)

Le premier prédicteur est fonction de la mesure d'intensité tandis que le second est une constante :

$$\eta_1 = \theta_0 + \theta_1 \cdot \text{loge}(\text{PGA})$$

(7)

$$\eta_2 = \theta_0$$

(8)

où θ_0 , θ_1 et θ_0 sont des coefficients de régression. La régression bêta est effectuée dans R [33] en utilisant le package betareg. Enfin, le modèle logistique et le bêta conditionné Les modèles sont combinés pour obtenir le modèle de vulnérabilité (Figure 4d). Ainsi, pour une donnée typologie du bâtiment, cinq paramètres β_0 , β_1 , θ_0 , θ_1 , θ_0 définir le modèle de vulnérabilité. La valeur attendue et la variance du DF pour le modèle combiné sont données comme suit :

$$E[DF] = p \cdot \mu$$

(9)

$$\text{Var}[DF] = p \cdot \frac{\mu \cdot (1-\mu)}{\gamma + 1} + (1-p) \cdot p \cdot (\mu)^2$$

(dix)

Le théorème de probabilité totale peut ensuite être utilisé pour calculer l'intervalle de prédiction souhaité :

$$P[X < x] = 1 + p \cdot (FX(x, \mu, \gamma) - 1)$$

(11)

où $FX(x, \mu, \gamma)$ est la fonction de distribution cumulative bêta (CDF) pour un bâtiment donné typologie, qui est une fonction du PGA. Ainsi, à partir du modèle de vulnérabilité, il est possible pour calculer directement le PDF pour la variable aléatoire DF pour un PGA donné. Un exemple de ceci est illustré sur la figure 4e pour un PGA = 0,4 g. Enfin, en définissant des bacs pour différents dommages étapes, des courbes de fragilité peuvent être construites à l'aide de l'équation (11). Les bacs à pertes et le verbal La description de chaque état de dommage ici est basée sur [35] (voir Tableau 3). Courbes de fragilité basés sur la procédure sont illustrés à la figure 4f. Pour plus de détails, voir Bessason et coll. [17].

4. Résultats et discussion

4.1. Courbes de vulnérabilité et courbes de fragilité

En remplaçant le PGA dans les équations (3) et (7) par la distance Joyner-Boore, RJB, un nouvel ensemble de paramètres de modèle a été estimé pour le modèle ZIBR. Pour tenir compte des valeurs aberrantes dans les deux ensembles de données, comme appliqué dans des études précédentes [13,17], tous les points de données avec un DF > 0,85 ont été remplacés par une valeur maximale de DFmax = 0,85. Cela a été réalisé pour 15 bétons, 5 bâtiments en bois et 13 en maçonnerie dans l'ensemble de données de 2000, et pour 4 bâtiments en béton, 7 en bois et 12 logements en maçonnerie dans l'ensemble de données 2008. De plus, le même type de pondération des données a été réalisé comme dans [13,17]. Les paramètres du modèle sont donnés dans le tableau 4 pour le bâtiment typologies définies dans le tableau 2. Les courbes de vulnérabilité utilisant RJB comme paramètre d'intensité sont présentées dans la figure 5 pour cinq typologies de bâtiments pour chaque ensemble de données (tableau 2). Pour le 2000 ensemble de données, correspondant à un événement Mw6,5, le DF moyen est tombé à 0,01 (perte de 1%) à moins de Distance de 20 km pour les quatre classes de bâtiments en béton et en bois (Figure 5a, c, e, g) et à 23 km pour les bâtiments en maçonnerie. Pour le jeu de données de 2008, correspondant à un événement Mw6.3, le le DF moyen est de 0,01 à moins de 15 km pour les cinq typologies de bâtiments (Figure 5b, d, f, h, j). Dans la figure 6, les courbes de fragilité calculées directement à partir du modèle de vulnérabilité en utilisant la Les définitions de l'état de dommage données dans le tableau 3 et l'équation (11) sont présentées. Par exemple, à une distance de faille de 20 km (RJB), la probabilité de dépasser DS1 (légers dégâts) est moindre plus de 5% pour tous les bâtiments en béton et en bois de 1 à 2 étages basés sur le modèle du Ensemble de données de 2000. Pour l'ensemble de données 2008, la distance correspondante est de 15 km. De même, le probabilité de dépasser DS2 (dommages modérés), c'est-à-dire lorsque le DF dépasse 0,20 (20 % perte), est approximativement nulle à une distance Joyner-Boore de 20 km ou plus pour le no-code et bâtiments en béton low-code basés sur l'ensemble de données de 2000 (Figure 6a). Pour l'ensemble de données de 2008 et la même typologie de bâtiment, la probabilité de dépasser DS2 à une distance de 10 km ou plus (Figure 6b) est approximativement nul. Dans tous les cas, la probabilité de dépasser DS4 est très faible.

Tableau 4. Paramètres estimés du modèle ZIBR en utilisant la distance Joyner-Boore comme intensité mesure. Voir le tableau 2 pour la définition des typologies de bâtiments.

Base de données	Bâtiment Typologie	β_0	β_1	θ_0	θ_1	θ_0'
2000	C-NL	1.748	-0,202	-1,798	-0,148	1.592
2000	CM	0,800	-0,167	-2,505	-0,155	2.648
2000	W-NL	1.147	-0,192	-1,490	-0,215	1.480
2000	MW	1.098	-0,268	-2,765	-0,029	2.371
2000	M-NL	1.823	-0,191	0,0075	-0,616	0,964
2008	C-NL	2,551	-0,388	-2,327	-0,201	2.851
2008	C-MH	2,018	-0,386	-2,928	-0,204	3.756
2008	W-NL	0,764	-0,185	-2,389	-0,020	2.395
2008	W-MH	0,748	-0,175	-2,997	-0,160	3,635
2008	M-NL	2,094	-0,302	-1,307	-0,247	1,185

Un indicateur de fiabilité des modèles de vulnérabilité de la figure 5 peut être mesuré en les utilisant pour simuler à la fois le DF moyen et la perte accumulée en 2000 et 2008 tremblement de terre et comparer les résultats aux observations réelles. Le résultat de cette simulation pour chaque typologie de bâtiment et chaque ensemble de données est présenté dans le tableau 5. Les ratios se situent dans les limites limites raisonnables : le ratio le plus bas pour RDF est de 0,81 et le plus élevé est de 1,18. Pour RLoss, le le ratio le plus bas est de 0,98 et le plus élevé est de 1,17. Cela indique que le modèle ZIBR calibré pour la distance Joyner – Boore fournit des résultats acceptables et comparables aux résultats obtenu en utilisant le PGA comme mesure d'intensité (voir [17]).

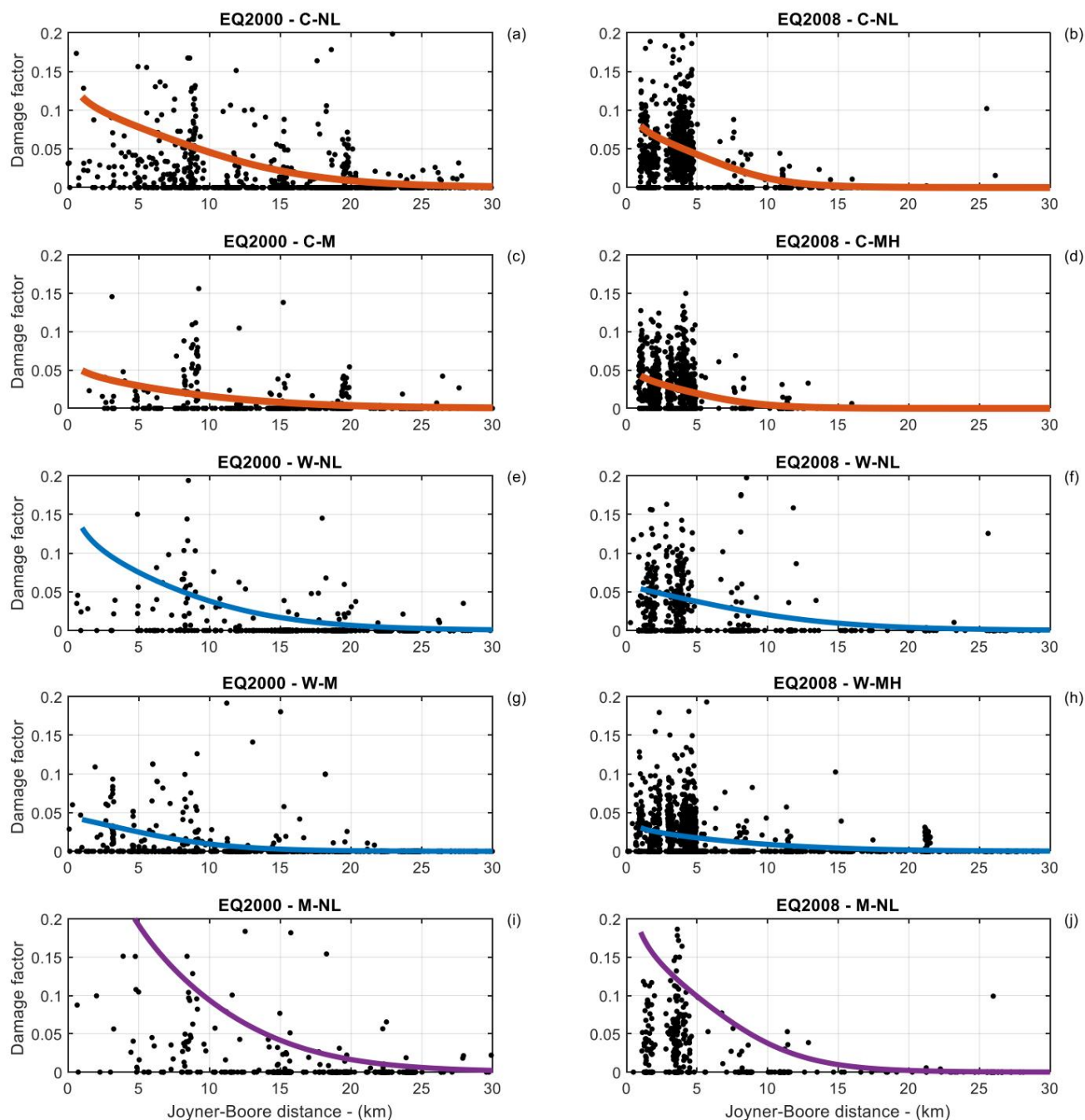


Figure 5. Données brutes (points noirs) et fonctions d'ajustement pour les bâtiments à un et deux étages basés sur le modèle ZIBR avec la distance Joyner-Boore comme mesure d'intensité pour le no- et low-code basé sur le modèle ZIBR avec la distance Joyner-Boore comme mesure d'intensité pour le no- et low-code. (a) l'ensemble de données de 2000 et (b) l'ensemble de données de 2008 ; (c) bâtiments/habitations en béton de code modéré dans l'ensemble de données de 2000 et (d) l'ensemble de données de 2008 ; (e) l'ensemble de données de 2000 et (f) l'ensemble de données de 2008 ; (g) bâtiments en bois de code modéré dans l'ensemble de données de 2000 et (h) l'ensemble de données de 2008 ; (i) l'ensemble de données de 2000 et (j) l'ensemble de données de 2008 ; (k) bâtiments en maçonnerie sans code et à faible code dans l'ensemble de données de 2000 et (l) dans l'ensemble de données de 2008.

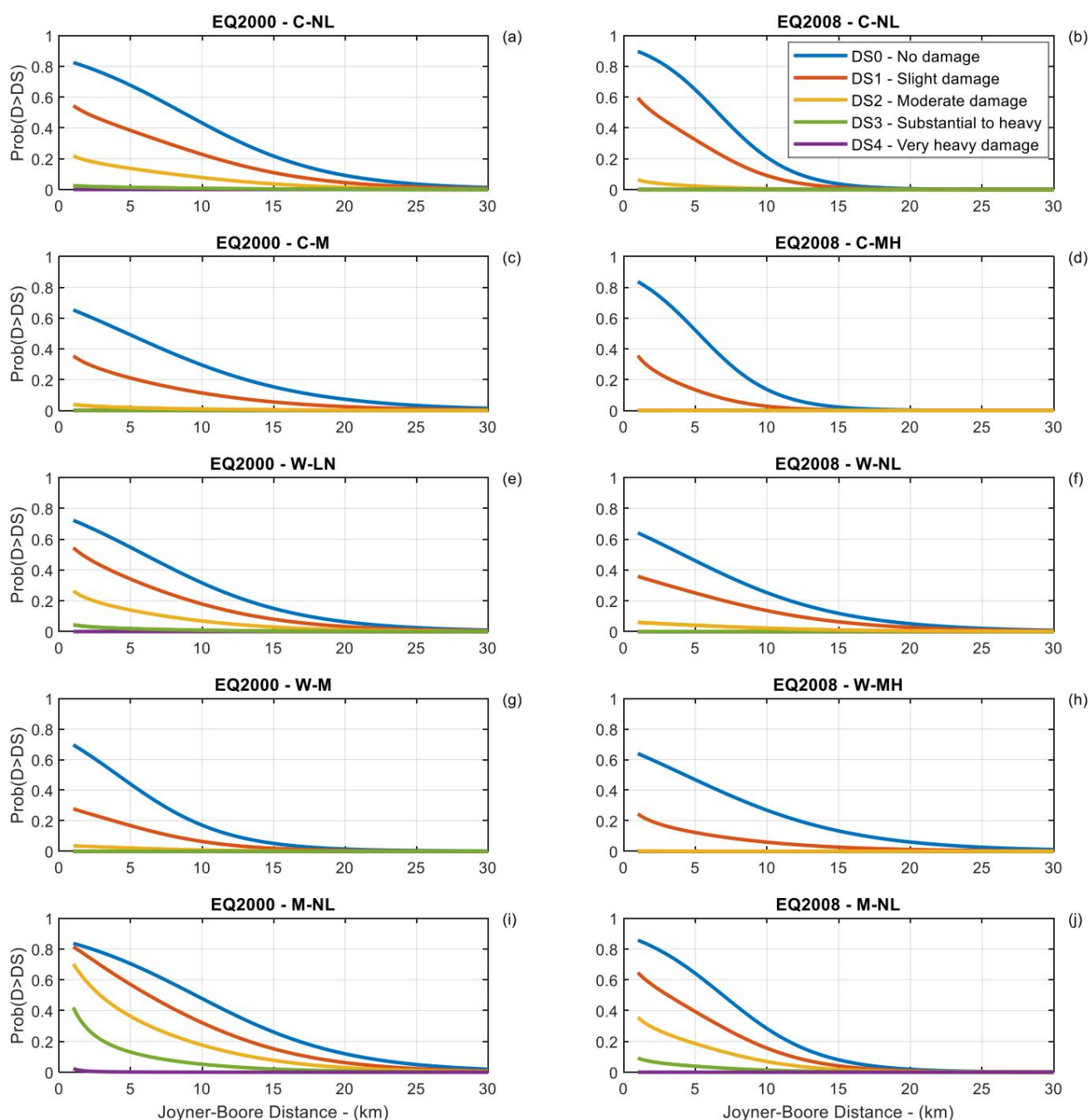


Figure 6. Fonctions de fragilité pour les bâtiments/habitations en maçonnerie sans code et à faible code (a) dans l'ensemble de données de 2000 et (b) dans l'ensemble de données de 2008 ; (c) bâtiments/habitations en bois sans code et à faible code (a) dans l'ensemble de données de 2000 et (b) dans l'ensemble de données de 2008 ; (c) bâtiments/habitations en bois à code modéré et élevé dans l'ensemble de données de 2000 et (d) dans l'ensemble de données de 2008 ; (e) bâtiments/habitations en bois à code modéré et élevé dans l'ensemble de données de 2000 et (f) dans l'ensemble de données de 2008 ; (g) bois de code modéré et élevé dans l'ensemble de données de 2000 et (h) dans l'ensemble de données de 2008 ; (i) bâtiments/habitations en maçonnerie sans code et à faible code dans l'ensemble de données de 2000 et (j) dans l'ensemble de données de 2008 ; (i) dans l'ensemble de données de 2000 et (j) dans l'ensemble de données de 2008.

4.2. Cartes de risques basées sur des scénarios

En utilisant les fonctions de vulnérabilité de la figure 5, des cartes de risques de scénario peuvent être construites. Le séisme de 6h36 du 23 juillet 1929 avec un épicentre à 21,75° W et 63,95° N [12] est utilisé comme scénario (voir Figure 1). Cet événement peut être considéré comme celui qui a eu le plus d'effet sur l'ARC de tous les événements historiques et enregistrés instrumentalement connus dans

Tableau 5. Rapport entre le DF moyen simulé et le DF moyen réel à partir des données de perte (RDF) et rapport entre le DF simulé et le DF moyen réel à partir des données de perte (RDF).

la perte accumulée à la perte accumulée réelle (RLoss) pour les cinq typologies de bâtiments.

	Base de données	C-LN	CM ou C-MH	W-NL	WM ou W-MH	M-NL	Signifier
RDF	2000	0,94	0,99	0,81	0,90	0,87	0,90
RDF	2008	1.07	0,98	1.09	0,94	1.18	1.05
Perte	2000	1.17	1.06	1.12	1.11	1.11	1.11
Perte	2008	1.06	0,99	1h00	1.03	1.13	1.04

4.2. Cartes de risques basées sur des scénarios

En utilisant les fonctions de vulnérabilité de la figure 5, des cartes de risques de scénario peuvent être construites. Le séisme de Mw6,36 du 23 juillet 1929 avec un épicentre à 21,75° W et 63,95° N [12] est utilisé comme scénario (voir Figure 1). Cet événement peut être considéré comme ayant le plus d'effet dans le RCA de tous les événements historiques et enregistrés instrumentalement connus dans les environs de Reykjavik. Le modèle de rupture souterraine de Wells et Coppersmith [24] est utilisé pour estimer la ligne de faille projetée sur la surface (ligne pointillée marron sur la figure 1), qui est puis utilisé pour calculer la distance Joyner – Boore. On suppose que l'épicentre se situe au centre de la faille. Étant donné que le parc immobilier résidentiel de la RCA est constitué principalement (>92 %) des bâtiments en béton (section 2.2), seuls ces bâtiments sont pris en compte. La figure 7 montre le risque cartes sous forme de facteur de dommage moyen pour le béton résidentiel à un ou deux étages bâtiments. Les contours de la perte moyenne sont présentés pour les bâtiments sans code et à faible code dans Figure 7a utilisant les fonctions de vulnérabilité de l'ensemble de données 2000 et figure 7b pour le courbes de vulnérabilité basées sur l'ensemble de données de 2008. La figure 7c montre les contours de la moyenne dommages causés aux bâtiments en béton de code modéré sur la base de l'ensemble de données de 2000 et de la figure 7d pour bâtiments à code modéré et élevé, basés sur l'ensemble de données de 2008. Si l'ensemble de données de 2000 est considéré comme représentatif d'un événement Mw6.5 et l'ensemble de données de 2008 comme représentatif pour un événement Mw6.3, il est clair comment l'ampleur affecte l'étendue des dégâts. Le L'effet du niveau du code sismique est également clairement distingué.

Les cartes de la figure 7 donnent des informations utiles sur les pertes moyennes, ce qui est important à des fins d'assurance en cas de catastrophe, mais ils ne fournissent aucune information sur la répartition des les pertes sur différents sites, ce qui est important pour la gestion des urgences. Par exemple, des informations sur le nombre de bâtiments (en pourcentage) qui ne sont pas endommagés et combien sont gravement endommagé n'est pas disponible dans cette représentation. Ces informations peuvent être affiché en construisant des cartes de risques de scénarios pour les états de dommages en fonction de la fragilité courbes de la figure 6. Dans la figure 8, les cartes des risques pour les zones résidentielles en béton d'un à deux étages les bâtiments conçus pendant la période no-code et low-code, c'est-à-dire avant 1976, sont présentés pour états de dommages DS0, DS1, DS2 et DS3 sur la base de l'ensemble de données 2000 correspondant à un événement de Mw6.5. A titre d'exemple, la figure 8a montre la probabilité de dépasser DS0 (pas de dommage). Pour la plus grande partie de la RCA, la probabilité de subir des pertes est de 40 à 60 %. Pour le centre de Reykjavik, la probabilité se situe entre 20 et 40 %. En revanche, la probabilité de dépasser DS3 et d'obtenir plus de 50 % de perte est dans tous les cas inférieur à 2 % (figure 8d).

Dans la figure 9, les cartes de risques correspondantes sont présentées pour la même typologie de bâtiment, sauf maintenant les résultats sont basés sur des courbes de fragilité calibrées à partir du jeu de données de 2008, correspondant à un événement de Mw6.3. D'après la figure 9c, la probabilité de dépasser DS2 de plus de 20 % la perte est inférieure à 2% dans tous les cas.

Dans la figure 10, des cartes de risques de scénarios sont présentées pour des habitations résidentielles en béton d'un à deux étages. bâtiments conçus dans la période du code modéré après 1976, pour les états de dommages DS0 et DS1, basé sur l'ensemble de données 2000 (Mw6.5). A titre d'exemple, la probabilité de dépasser DS1 (dégâts mineurs) est proche de 20 % pour les chantiers les plus exposés (Figure 10b). Enfin, dans Figure 11, cartes de risques pour les bâtiments résidentiels en béton d'un à deux étages conçus dans le Les périodes de code modéré et de nouveau code, c'est-à-dire après 1976, sont indiquées pour les états de dommage DS0 et DS1, basé sur l'ensemble de données de 2008 (Mw6.3). La probabilité de dépasser DS1 (dommages mineurs) est proche de 10 % pour le bâtiment le plus exposé en périphérie du RCA.

sous rs maps n te orm o te acteur de dommages moyens ou bâtiments en béton resenta d'un à deux étages. Les contours de la perte moyenne sont présentés pour les bâtiments sans code et à faible code dans la figure 7a en utilisant les fonctions de vulnérabilité de l'ensemble de données de 2000 et dans la figure 7b pour les courbes de vulnérabilité basées sur l'ensemble de données de 2008. La figure 7c montre les contours des dommages moyens pour les bâtiments en béton à code modéré sur la base de l'ensemble de données de 2000 et la figure 7d pour les bâtiments à code modéré et élevé sur la base de l'ensemble de données de 2008.

Si l'ensemble de données de 2000 est considéré comme représentatif d'un événement de 6,5 et celui de 2008 comme représentatif d'un événement de 6,3, il est clair comment l'ampleur affecte l'étendue des dégâts. L'effet du niveau du code sismique est également clairement distingué.

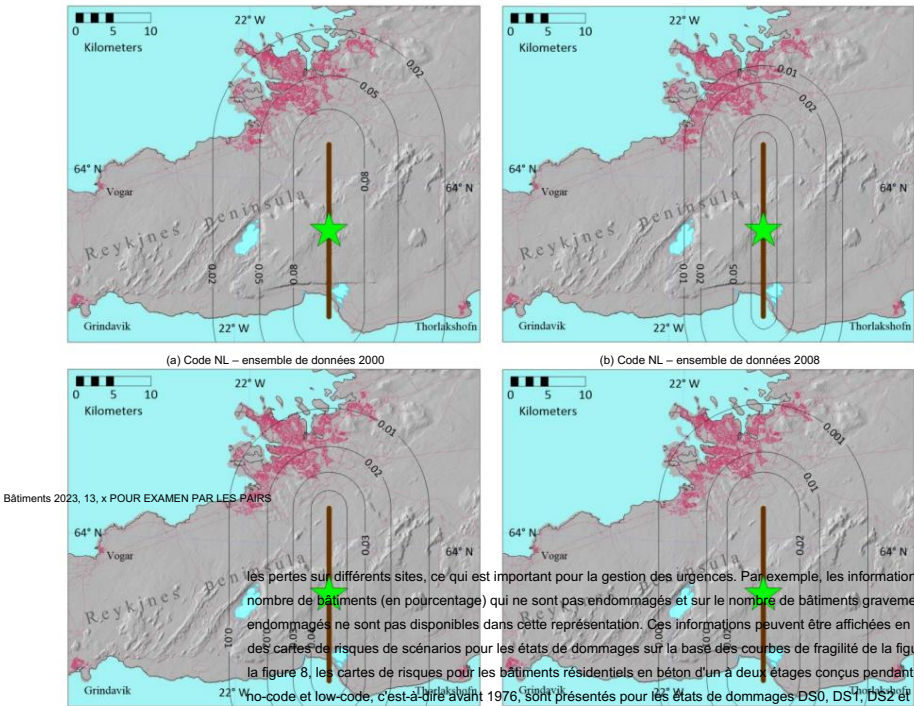


Figure 7. Carte des risques de scénario montrant le facteur de dommage moyen prévu pour les dommages au béton d'un à deux étages

fonctions de vulnérabilité de la typologie, mais que maintenant les résultats sont basés sur des courbes de fragilité calibrées à partir des bâtiments à code modéré et élevé sur l'ensemble de données de 2008 (Mw6.5) ; (b) bâtiments sans code et low-code basés sur l'ensemble de données de 2000 (Mw6.5) ; (c) bâtiments basés sur les données de 2000 à code modéré basées sur l'ensemble de données de 2000 (Mw6.5) ; et (d) code modéré et élevé sur l'ensemble de données de 2008 (Mw6.3) ;

Les cartes de risque de scénario pour les bâtiments en béton armé d'un à deux étages, sans code et à faible code, sont présentées pour les états de dommages DS0, DS1, DS2 et DS3 sur la base de l'ensemble de données de 2000 correspondant à un (c) code M – ensemble de données de 2000 (d) code MH – ensemble de données de 2008 (6.3). Les cartes correspondantes sont présentées pour l'ensemble de données de 2008 (6.5). À titre d'exemple, la figure 8a montre la probabilité de dépasser DS0 (pas de figure 7. Carte des risques de scénario montrant le facteur de dommage moyen prévu pour les dommages au béton d'un à deux étages).

Les cartes montrent la probabilité que l'état du dommage (a) dépasse DS0 ; (b) dépasse DS1 ; (c) dépasse DS2 ; et (d) dépasser DS3.

Les cartes de risque de scénario pour les bâtiments en béton armé d'un à deux étages, sans code et à faible code, sont présentées pour les états de dommages DS0, DS1, DS2 et DS3 sur la base de l'ensemble de données de 2000 correspondant à un (c) code M – ensemble de données de 2000 (d) code MH – ensemble de données de 2008 (6.3). Les cartes correspondantes sont présentées pour l'ensemble de données de 2008 (6.5). À titre d'exemple, la figure 8a montre la probabilité de dépasser DS0 (pas de figure 7. Carte des risques de scénario montrant le facteur de dommage moyen prévu pour les dommages au béton d'un à deux étages).

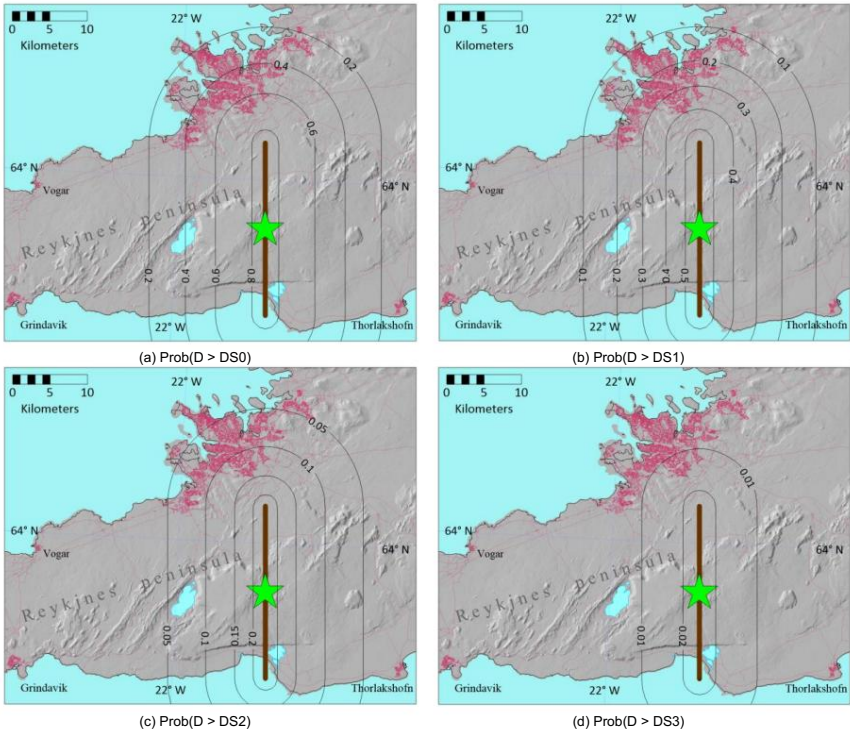


Figure 8. Carte des risques de scénario pour les bâtiments en béton armé d'un à deux étages, sans code et à faible code

Les cartes montrent la probabilité que l'état du dommage (a) dépasse DS0 ; (b) dépasse DS1 ; (c) dépasse DS2 ; et (d) dépasser DS3.

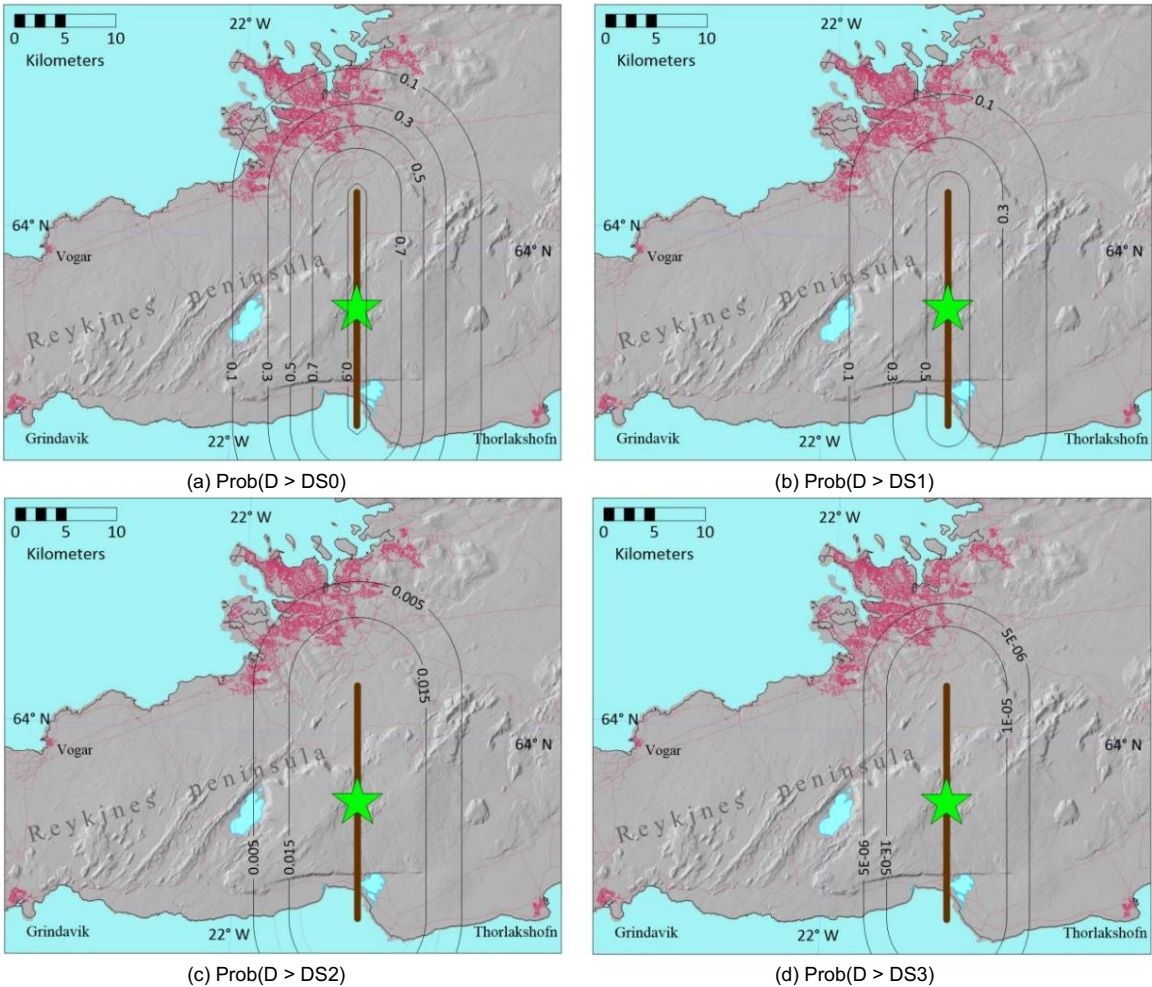


Figure 9. Carte des risques de scénario pour le béton armé de un à deux étages, sans code et low code Figure 9. Carte des risques de scénario pour le béton armé de un à deux étages, sans code et low code bâtiments, C-NL (construits avant 1976) sur la base du modèle de vulnérabilité de l'ensemble de données de 2008 (6.3). bâtiments, C-NL (construits avant 1976) basés sur le modèle de vulnérabilité de l'ensemble de données de 2008 (Mw6.3). Les cartes montrent la probabilité que l'état du dommage (a) dépasse DS0 ; (b) dépasse DS1 ; (c) dépasse DS2 ; et (d) dépasse DS3.

Bâtiments 2023, 13, x POUR EXAMEN PAR LES PAIRS

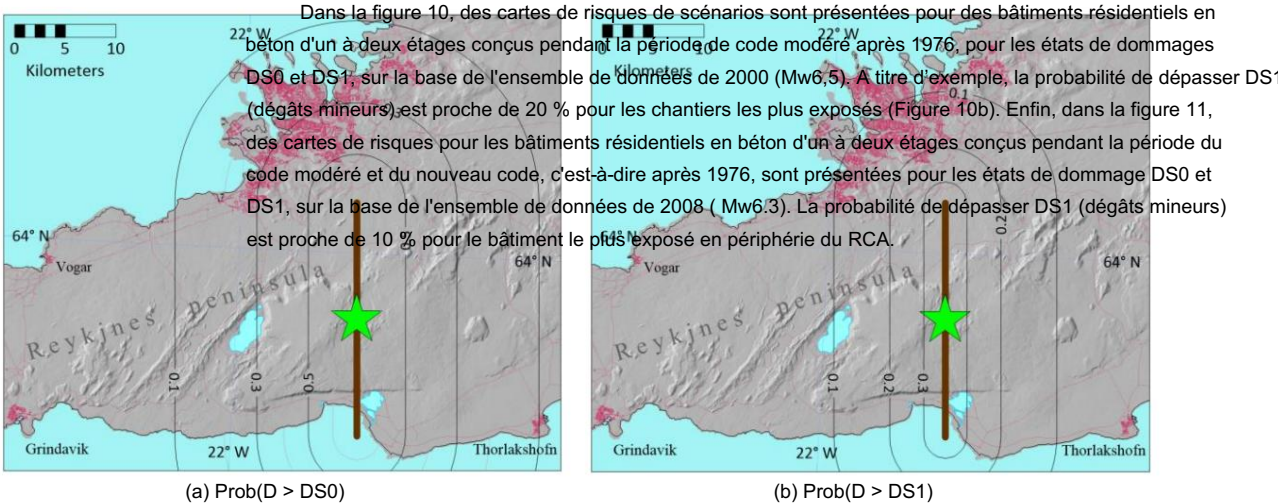
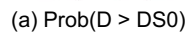


Figure 10. Carte de risque de scénario pour les bâtiments en béton armé de un à deux étages, de code modéré, Figure 10. Carte de risque de scénario pour les bâtiments en béton armé de un à deux étages, de code modéré, CM (construit après 1976) basé sur le modèle de vulnérabilité de l'ensemble de données de 2000 (6.5). Les cartes CM (construites après 1976) basées sur le modèle de vulnérabilité de l'ensemble de données de 2000 (Mw6.5). Les cartes montrent la probabilité que l'état du dommage (a) dépasse DS0 et (b) dépasse DS1.



5. Conclusions

Dans cette étude, des modèles empiriques avancés de vulnérabilité et des fonctions de fragilité pour

planification de la réponse.

Cartes de scénarios de risques sismiques, basées sur le scénario de tremblement de terre le plus dommageable au monde. le voisinage du RCA, c'est-à-dire le séisme de Mw6,36 de juillet 1929, ont été calculés pour bâtiments en béton de faible hauteur, montrant à la fois la perte moyenne prévue et la probabilité de dépassant différents états de dommage. Même s'il existe beaucoup d'incertitude quant à la faute

Longueurs, magnitude, épicerie exact, ainsi que propagation des ondes et attention, les cartes donnent une indication utile des dommages auxquels on peut s'attendre lors de séismes de l'ordre de 6,3 à 6,5 pour les bâtiments d'un à deux étages. L'étude montre qu'il existe une différence considérable dans les dommages attendus pour les événements 6.3 et 6.5. De plus, les niveaux de code utilisés dans la conception sont facilement visibles sur les cartes. Ici, il convient de garder à l'esprit que les bâtiments les plus récents, qui sont des bâtiments à code modéré ou à code élevé, sont généralement situés en périphérie du RCA (Reykjavik, Kopavogur, Gardabær et Hafnafjörður), et donc les plus proches du centre actif. zones sismiques de la péninsule de Reykjanes.

Les deux ensembles de données complets des tremblements de terre de 2000 et de 2008 dans le sud de l'Islande contiennent principalement des bâtiments résidentiels d'un à deux étages (>90 %) et, par conséquent, les modèles de vulnérabilité empiriques locaux disponibles ne couvrent que ces types de bâtiments. Près de 60 % des logements de la RCA se trouvent dans des immeubles d'habitation en béton de trois à cinq étages, où le système de résistance aux charges latérales est constitué de murs porteurs. C'est donc un grand défi et un sujet de recherche ultérieure que de développer des modèles de vulnérabilité fiables pour de tels bâtiments.

Une approche analytique basée sur une modélisation numérique non linéaire des structures est une alternative viable pour de telles recherches.

Contributions des auteurs : Conceptualisation, BB, RR et J.Ö.B. ; Méthodologie, BB ; Validation, BB ; Analyse formelle, BB ; Ressources, J.Ö.B. ; Rédaction – ébauche originale, BB ; Rédaction – révision et édition, RR et J.Ö.B. ; Visualisation, BB Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Les auteurs remercient l'Assurance des catastrophes naturelles d'Islande d'avoir mis à leur disposition la base de données sur les dommages causés par les tremblements de terre et d'autres informations pertinentes. Cette recherche a été financée par le Fonds islandais pour la recherche (subvention n° 218149-051) et le Fonds pour la recherche de l'Université d'Islande.

Déclaration de disponibilité des données : les données sont contenues dans l'article.

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Les références

1. Bruneau, M. ; Reinhorn, A. Explorer le concept de résilience sismique pour les établissements de soins de courte durée. Terreq. Spectres 2007, 23, 41-62. [\[Référence croisée\]](#)
2. Sangaki, AH ; Rofoei, FR ; Vafai, H. Cadre intégré probabiliste et modèles compatibles avec les méthodes de fiabilité pour évaluation de la résilience sismique des structures. Structures 2021, 34, 4086-4099. [\[Référence croisée\]](#)
3. Forcellini, D. Un cadre rapide pour évaluer la résilience sismique (SR) des configurations structurelles. Structures 2023, 56, 105015. [\[CrossRef\]](#)
4. ATC -13 ; Données d'évaluation des dommages causés par le tremblement de terre pour la Californie. Conseil des technologies appliquées : Redwood City, Californie, États-Unis, 1985 ; pp. 1 à 492.
5. ATC -13-1 ; Commentaire sur l'utilisation des données d'évaluation des dommages dus au séisme ATC-13 pour les études de pertes maximales probables de Bâtiments californiens. Conseil des technologies appliquées : Redwood City, Californie, États-Unis, 2002 ; pp. 1 à 66.
6. Rota, M. ; Penna, A. ; Magenes, G. Une méthodologie pour dériver des courbes de fragilité analytiques pour les bâtiments en maçonnerie basées sur des données stochastiques analyses non linéaires. Ing. Structure. 2010, 32, 1312-1323. [\[Référence croisée\]](#)
7. Ruggieri, S. ; Calò, M. ; Cardellicchio, A. ; Uva, G. Cadre analytique et mécanique pour l'analyse sismique globale de la fragilité des bâtiments RC existants dans les compartiments urbains. Taureau. Terreq. Ing. 2022, 20, 8179-8216. [\[Référence croisée\]](#)
8. Rossetto, T. ; Elnashai, A. Dérivation de fonctions de vulnérabilité pour les structures RC de type européen sur la base de données d'observation. Ing. Structure. 2003, 25, 1241-1263. [\[Référence croisée\]](#)
9. Rota, M. ; Penna, A. ; Strobba, CL Traitement des données italiennes sur les dommages pour en dériver des courbes de fragilité typologiques. Dynamique du sol. Terreq. Ing. 2008, 28, 933-947. [\[Référence croisée\]](#)
10. Colombie, M. ; Borzi, B. ; Crowley, H. ; Onida, M. ; Méroni, F. ; Pinho, R. Dérivation de courbes de vulnérabilité à l'aide des données sur les dommages causés par les tremblements de terre italiens. Taureau. Terreq. Ing. 2008, 6, 485-504. [\[Référence croisée\]](#)
11. Pedersen, R. ; Jonsson, S. ; Arnadóttir, T. ; Sigmundsson, F. ; Feigl, KL Répartition des glissements de faille de deux MW6 de juin 2000. 5 tremblements de terre dans le sud de l'Islande estimés à partir de l'inversion conjointe des mesures InSAR et GPS. Planète Terre. Sci. Lett. 2003, 213, 487-502. [\[Référence croisée\]](#)
12. Jonasson, K. ; Bessason, B. ; Helgadóttir, Á. ; Einarsson, P. ; Gudmundsson, GB ; Brandsdóttir, B. ; Vogfjörð, KS ; Jónsdóttir, K. Un catalogue instrumental harmonisé des tremblements de terre pour l'Islande et la dorsale médio-atlantique nord. Nat. Risques Terre Syst. Sci. 2021, 21, 2197-2214. [\[Référence croisée\]](#)
13. Bessason, B. ; Bjarnason, J.Ö. ; Rupakhety, R. Modélisation statistique de la vulnérabilité sismique des bâtiments en béton armé, en bois et en maçonnerie à partir de données empiriques complètes sur les pertes. Ing. Structure. 2020, 209, 109969. [\[Réf. croisée\]](#)

14. Sigbjörnsson, R. ; Snæbjörnsson, JT; Higgins, SM; Halldórsson, B. ; Ólafsson, S. Une note sur le tremblement de terre Mw6.3 en Islande le 29 Mai 2008 à 15h45 UTC. Taureau. Terreq. Ing. 2009, 7, 113-126. [\[Référence croisée\]](#)
15. Halldórsson, B. ; Sigbjörnsson, R. Le tremblement de terre Mw6.3 d'Ölfus à 15h45 UTC le 29 mai 2008 dans le sud de l'Islande : enregistrements de mouvements forts ICEARRAY. Dynamique du sol. Terreq. Ing. 2009, 29, 1073-1083. [\[Référence croisée\]](#)
16. Ioannou, I. ; Bessason, B. ; Kosmidis, I. ; Bjarnason, J.Ö.; Rossetto, T. Évaluation empirique de la vulnérabilité sismique des bâtiments islandais touchés par la séquence de tremblements de terre de 2000. Taureau. Terreq. Ing. 2018, 16, 5875-5903. [\[Référence croisée\]](#)
17. Bessason, B. ; Bjarnason, J.Ö.; Rupakhety, R. Comparaison et modélisation des pertes de bâtiments dans le sud de l'Islande causées par différents séismes de taille. J. Construire. Ing. 2022, 46, 103806. [\[Réf. croisée\]](#)
18. Rupakhety, R. ; Sigbjörnsson, R. Équations de prédiction du mouvement du sol (GMPE) pour la réponse inélastique et les facteurs de comportement structurel . Taureau. Terreq. Ing. 2009, 7, 637-659. [\[Référence croisée\]](#)
19. Joyner, WB; Boore, DM Accélération et vitesse horizontales maximales à partir d'enregistrements de mouvements forts, y compris les enregistrements du tremblement de terre de 1979 à Imperial Valley, en Californie. Taureau. Sismol. Soc. Suis. 1981, 71, 2011-2038. [\[Référence croisée\]](#)
20. Institut islandais d'histoire naturelle. 2023. Disponible en ligne : <https://jardfraedikort.ni.is/> (consulté le 15 octobre 2023).
21. Atakan, K. ; Brandsdóttir, B. ; Halldórsson, P. ; Fridleifsson, GO Réponse du site en fonction de la géologie proche de la surface dans le Sud Zone sismique d'Islande. Nat. Risques 1997, 15, 139-164. [\[Référence croisée\]](#)
22. Einarsson, P. Limites, fissures et transformations des plaques en Islande. Jökull 2008, 58, 35-58. [\[Référence croisée\]](#)
23. Einarsson, P. ; Hjartardóttir, Á.R. ; Hreinsdóttir, S. ; Imsland, P. La structure des failles décrochantes sismogènes dans la partie orientale du rift oblique de la péninsule de Reykjanes, dans le sud-ouest de l'Islande. J. Volcanol. Géothermie. Rés. 2020, 391, 106372. [\[Réf. croisée\]](#)
24. Wells, DL; Coppersmith, KJ Nouvelles relations empiriques entre l'ampleur, la longueur de rupture, la largeur de rupture, la zone de rupture et déplacement superficiel. Taureau. Sismol. Soc. Suis. 1994, 84, 974-1002. [\[Référence croisée\]](#)
25. Hernández-Aguirre, VM; Rupakhety, R. ; Olafsson, S. ; Bessason, B. ; Erlingsson, S. ; Paolucci, R. ; Smerzini, C. Fort mouvement du sol dû aux essais sismiques précédant les éruptions volcaniques de 2021 et 2022 à Fagradalsfjall, Islande. Taureau. Terreq. Ing. 2023, 21, 4707-4730. [\[Référence croisée\]](#)
26. Saemundsson, K. ; Sigurgeirsson, M.Á. Péninsule de Reykjanes. Dans Risques naturels en Islande, éruptions volcaniques et tremblements de terre ; Sólmes, J., Sigmundsson, F., Bessason, B., éd.; Presses de l'Université d'Islande : Reykjavik, Islande ; Assurance contre les catastrophes naturelles d' Islande : Kópavogur, Islande, 2013 ; pp. 379-401. (En islandais)
27. Assurance contre les catastrophes naturelles de l'Islande. 2023. Disponible en ligne : <https://island.is/en/o/nti> (consulté le 15 octobre 2023).
28. Registre de propriété. 2023. Disponible en ligne : <https://www.fastegnaskra.is/english> (consulté le 15 octobre 2023).
29. Rossetto, T. ; Ioannou, moi; Accorder, DN ; Maqsood, T. Lignes directrices pour l'évaluation empirique de la vulnérabilité ; Fondation GEM : Pavie, Italie, 2014.
30. Brzev, S. ; Scawthorn, C. ; Charleson, AW; Allen, L. ; Greene, M. ; Jaiswal, K. ; Silva, V. Taxonomie du bâtiment GEM ; Version 2.0 ; GEMME Rapport technique n° 2013-02 ; Fondation GEM : Pavie, Italie, 2013.
31. Crowley, H. ; Despotaki, V. ; Silva, V. ; Dabbeek, J. ; Romão, X. ; Pereira, N. ; Castro, JM ; Daniell, J. ; Velu, E. ; Bilgin, H. ; et coll. Modèle de niveaux de force latérale de conception sismique pour le parc immobilier européen existant en béton armé. Taureau. Terreq. Ing. 2021, 19, 2839-2865. [\[Référence croisée\]](#)
32. Ospina, R. ; Ferrari, SLP Une classe générale de modèles de régression bêta gonflés de zéro ou un. Calculer. Stat. Données analytiques. 2012, 56, 1609-1623. [\[Référence croisée\]](#)
33. Équipe de base R. R : Un langage et un environnement pour le calcul statistique ; R Foundation for Statistical Computing : Vienne, Autriche, 2023. Disponible en ligne : <https://www.R-project.org/> (consulté le 15 octobre 2023).
34. Ferrari, SLP ; Cribari-Neto, F. Régression bêta pour la modélisation des taux et des proportions. J.Appl. Stat. 2004, 31, 799-815. [\[Référence croisée\]](#)
35. Dolce, M. ; Kappos, A. ; Masi, A. ; Penelis, G. ; Vona, M. Évaluation de la vulnérabilité et scénarios de dommages sismiques du parc immobilier de Potenza (sud de l'Italie) à l'aide des méthodologies italiennes et grecques. Ing. Structure. 2006, 28, 357-371. [\[Référence croisée\]](#)

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.