

## REMARQUE 2b

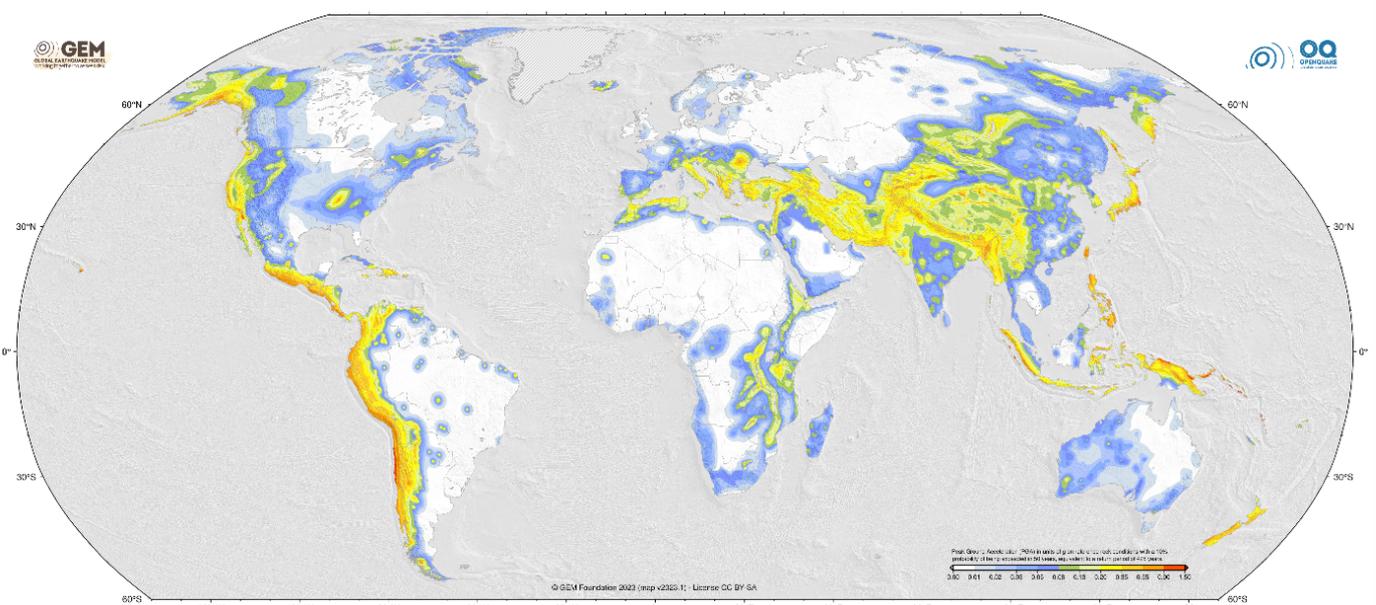
### Modélisation du risque sismique

Les tremblements de terre sont parmi les risques les plus catastrophiques. Ils peuvent avoir des impacts à grande échelle sur des régions et des villes entières, se produire avec peu ou pas d'avertissement, et sont souvent associés à des pertes importantes et à des dommages physiques à l'environnement bâti. Les tremblements de terre peuvent également déclencher des dangers en cascade, tels que des répliques, des tsunamis, des glissements de terrain et la liquéfaction.

Les tremblements de terre peuvent se produire n'importe où, mais la grande majorité des tremblements de terre (et les plus graves) sont d'origine géologique, résultant de la déformation et de la collision des continents (plaques tectoniques). Ils ont donc tendance à se produire à proximité des limites des plaques, le long des lignes de faille tectonique (Graphique 1). D'autres types de tremblements de terre peuvent être déclenchés par une activité volcanique ou même par l'homme (comme l'exploitation minière, l'effondrement de barrages hydrologiques ou des explosions majeures). Les tremblements de terre d'origine humaine sont généralement beaucoup moins graves que les tremblements de terre géologiques. Cette note se concentre uniquement sur les tremblements de terre géologiques.

Contrairement aux inondations ou aux tempêtes de vent, les tremblements de terre ont tendance à avoir de longs intervalles de récurrence dans un endroit donné, allant de plusieurs décennies à plusieurs milliers d'années. En conséquence, les données historiques sont souvent rares et sporadiques, et l'expérience récente est un mauvais indicateur du risque de tremblement de terre. Pour comprendre la probabilité et la gravité des tremblements de terre, il faut modéliser les phénomènes physiques et leurs impacts associés.

**Figure 1:** Carte de l'aléa sismique (période de retour de 475 ans)



Source : Modèle mondial de tremblement de terre, « Carte mondiale de l'aléa sismique », 2023,

<https://www.globalquakemodel.org/product/global-seismic-hazard-map>.

Remarque : Les secousses du sol, de la moins grave à la plus sévère, sont indiquées par des couleurs bleues, jaunes, oranges et rouges.

## Approche de modélisation sismique

Développés dans les années 1980, les modèles de risque sismique ont été parmi les premiers à combiner des modules sur l'aléa, l'exposition, la vulnérabilité et les pertes (voir la note 2 sur la modélisation des risques de catastrophe pour plus de détails) ; Ceux-ci sont maintenant couramment utilisés dans le secteur du financement des risques.

### Le module de danger comprend :

- a) Une estimation de la probabilité et de la gravité d'un tremblement de terre, y compris l'emplacement, la magnitude et la probabilité annuelle. Cela comprend un inventaire de toutes les failles sismiques connues et une estimation de la fréquence des tremblements de terre associés (récurrence) le long de ces failles. Les données instrumentales du siècle dernier sont trop courtes pour fournir une estimation réaliste de la fréquence des tremblements de terre (à cet égard, les tremblements de terre diffèrent des cyclones tropicaux et des inondations). Le calcul de la récurrence des tremblements de terre est donc éclairé par des preuves géologiques utilisant l'imagerie satellite, les techniques de datation et les systèmes GPS. Par souci d'exhaustivité, les enregistrements instrumentaux des tremblements de terre sont inclus dans le modèle et sont utilisés pour dériver des événements stochastiques potentiels à l'aide de principes statistiques et physiques.
- b) La quantification de la gravité des secousses de sol à chaque emplacement d'actif. Les secousses du sol sont estimées en fonction de l'emplacement de chaque actif par rapport à l'épicentre et en fonction de la magnitude du tremblement de terre. Les conditions locales du sol (p. ex., sol meuble, roche dure) et la topographie sont également prises en compte, car elles peuvent avoir un effet d'amplification sur les secousses du sol. Les mesures courantes des secousses du sol sont l'accélération maximale du sol et l'intensité Mercalli modifiée (MMI).

Certains modules d'aléa incluent également des effets secondaires tels que le tsunami (hauteur des vagues à la ligne de rivage, inondation à l'intérieur des terres) ; Ceux-ci peuvent également être modélisés à l'aide de modèles hydrologiques (par exemple, la propagation des vagues).

Le module d'exposition utilise des inventaires détaillés des actifs bâtis et de la population. Le module d'exposition consiste en un inventaire détaillé des actifs, y compris les détails de l'emplacement (p. ex., latitude et longitude, adresse municipale), le coût de remplacement et les caractéristiques des actifs (p. ex., type de construction, année de construction, nombre d'étages, système de contreventement, étages mous).

Enfin, le module de vulnérabilité utilise les connaissances disponibles sur les dommages physiques causés par les tremblements de terre à divers types de bâtiments et d'infrastructures. Les dommages causés à chaque actif sont estimés en fonction de l'intensité des tremblements de terre, des observations historiques des dommages causés par les tremblements de terre ou de la simulation numérique des bâtiments en fonction de leurs caractéristiques de construction.

La combinaison de ces modules permet l'estimation probabiliste des pertes, soit des pertes totales (de base), soit des pertes conservées et transférées lorsque des conditions financières sont appliquées (par exemple, limites, franchises).<sup>1</sup>

Voir par exemple W. D. Smith et al., « Earthquake Risk Assessment for Insurance Purposes », 2004, <https://db.nzsee.org.nz/2004/Paper24.pdf>.



## Implications pour le financement et l'assurance des risques de catastrophe

La modélisation de scénarios sismiques possibles à l'aide de l'approche ci-dessus permet de développer une courbe de perte (profil de risque) pour estimer les pertes probables en fonction de la probabilité annuelle pour des actifs individuels ou un portefeuille entier (par exemple, bâtiments, personnes, infrastructures). Une telle modélisation est cruciale pour éclairer l'élaboration d'une stratégie de financement des risques de catastrophe (voir la note 1).

De plus, la modélisation des risques est utilisée pour concevoir des polices d'assurance contre les tremblements de terre et déterminer leur tarification. Parmi les exemples de régimes d'assurance indemnisation directement éclairés par les modèles de risque sismique, citons le Turkish Catastrophe Insurance Pool (TCIP) et la couverture d'assurance résidentielle offerte en Nouvelle-Zélande par la Natural Hazard Commission (anciennement la Earthquake Commission). La modélisation sismique peut également être utilisée pour concevoir des déclencheurs paramétriques pour les instruments de financement des risques (voir l'encadré 1 pour l'application de la modélisation à l'assurance paramétrique dans le Pacifique).

### Encadré 1. Modélisation du risque sismique et son application à l'assurance paramétrique dans la région Pacifique

Situés sur la ceinture de feu, de nombreux pays insulaires du Pacifique sont très vulnérables au risque sismique, notamment (mais sans s'y limiter) Vanuatu, la Papouasie-Nouvelle-Guinée, les Tonga, les Samoa et les Fidji. Étant donné que la plupart des îles sont géographiquement petites, des tremblements de terre uniques peuvent avoir de graves répercussions sur des pays ou des régions entières et nuire à l'ensemble de l'économie nationale. Afin de mieux comprendre le risque sismique dans la région et d'éclairer les décisions de financement des risques, la Banque mondiale a financé l'Initiative d'évaluation et de financement des risques de catastrophe dans le Pacifique (PCRAFI). Cette initiative a permis de recueillir des données sur l'exposition, de dresser des inventaires des actifs bâtis et de la population, et de compiler des informations spécifiques à chaque pays sur les dangers et les risques (dans le Système d'information sur les risques du Pacifique, PACRIS).

En 2011, à l'aide de l'approche de modélisation décrite ci-dessus, l'initiative a développé un modèle de risque stochastique pour estimer les pertes probables associées aux tremblements de terre (coûts de reconstruction, pertes d'urgence) et pour créer des profils de risque sismique pour chaque pays. En 2024, la Banque mondiale a travaillé avec la Pacific Catastrophe Risk Insurance Company (PCRIC), le pool régional de risques, et des experts du secteur privé pour élaborer des profils de risque des personnes touchées, à l'aide d'informations actualisées sur les dangers et les risques.

Le PCRIC a utilisé ces informations pour concevoir des produits d'assurance paramétriques pour les tremblements de terre qui fournissent des paiements rapides aux gouvernements souverains à la suite de catastrophes. Ces paiements sont déclenchés dans les 10 à 20 jours suivant chaque événement et soutiennent les efforts de secours.

Pour tous les produits, le PCRIC a utilisé les profils de risque modélisés pour estimer les pertes annuelles moyennes et fixer le prix des produits. Les pertes modélisées ont été comparées aux pertes historiques afin de minimiser le risque de base (c'est-à-dire le risque que les paiements soient insuffisants ou ne soient pas déclenchés lorsque les pays subissent des dommages).

Deux types de produits paramétriques pour les tremblements de terre ont été développés. Le premier produit, mis en œuvre entre 2016 et 2023, comprend un déclencheur basé sur l'occurrence d'un événement appelé « perte modélisée » et utilise le modèle PCRAFI pour estimer les impacts locaux et calculer les dommages. À la suite d'un événement, l'emplacement de l'épicentre et les intensités d'ébranlement du sol signalées par l'United States Geological Survey sont appariés à l'événement d'aléa le plus proche existant dans la base de données du modèle en termes d'épicentre et de secousses du sol. L'événement d'aléa est ensuite superposé aux données d'exposition du bâtiment, et les dommages sont évalués en fonction de l'intensité de l'aléa (p. ex., secousses du sol) et des caractéristiques du bâtiment (p. ex., type de construction, année de construction, nombre d'étages). Une indemnisation est versée si les dommages qui en résultent dépassent un seuil convenu au préalable avec le gouvernement.

Une telle perte modélisée peut être calculée rapidement, quelques jours après qu'un événement s'est produit, et est généralement associée à un risque de base relativement faible par rapport à d'autres types de produits paramétriques (c'est-à-dire que les paiements sont liés aux dommages modélisés, de sorte qu'ils ont tendance à être fournis lorsque les dommages réels au sol se sont produits). Cependant, il dépend fortement de la qualité et de la robustesse du modèle.

Le PCRIC a développé un deuxième produit en 2024 pour répondre au besoin de données plus à jour (en raison de la croissance démographique et du développement urbain). Ce produit utilise des profils de risque plus récents. Au lieu d'un déclencheur de perte modélisée, ce nouveau produit utilise un indice paramétrique des personnes touchées, car cette mesure a un lien plus direct avec les pertes d'urgence et les efforts de secours que les dommages aux bâtiments. Cet indice est basé sur les tremblements de terre dans les zones administratives (par exemple, les districts ou les villages) et le nombre de personnes situées dans chaque zone (à l'aide du recensement national ou des données WorldPop) qui sont exposées à des intensités de tremblements de terre supérieures à MMI VII. Un paiement est fourni si l'indice dépasse un seuil convenu à l'avance.

## Foire aux questions

### Quelles sont les principales limites des modèles de risque sismique ?

Les informations sur les dommages restent rares et sporadiques pour un certain nombre d'actifs, en particulier pour les réseaux d'infrastructures critiques. Dans de nombreux pays, ces informations sur les dommages sont insuffisantes pour calibrer et valider le modèle de manière appropriée. Par conséquent, les évaluations de vulnérabilité sont généralement associées à de grandes incertitudes, et celles-ci doivent être prises en compte par les décideurs.

De plus, de nombreux modèles de risque sismique existants ont tendance à estimer la probabilité et la gravité des tremblements de terre uniquement, c'est-à-dire qu'ils n'incluent pas les effets en cascade ou d'autres dangers (tels que les répliques, les tsunamis, les glissements de terrain et la liquéfaction) que les tremblements de terre peuvent déclencher. Bien que des ajustements du modèle puissent être appliqués pour tenir compte de ces dangers en cascade, la recherche analysant l'impact combiné des dangers en cascade n'en est qu'à ses débuts.

### Qu'est-ce qui est possible si aucune donnée locale ne peut être obtenue ?

Des modèles mondiaux tels que le Global Earthquake Model (GEM) ont été développés au cours de la dernière décennie et sont le résultat de collaborations universitaires entre les pays. Ils permettent d'estimer les pertes dues aux tremblements de terre dans l'environnement bâti (bâtiments résidentiels, commerciaux et industriels) et aux personnes au niveau infranational. Ces modèles peuvent fournir une première représentation du risque sismique et des pertes potentielles. Cependant, les utilisateurs doivent être conscients que ces modèles n'ont pas forcément été validés localement pour tous les pays.

### Comment savoir si je peux faire confiance à un modèle de risque sismique ?

Bien que les modèles de risque sismique présentent des degrés élevés de biais et d'incertitude potentiels en raison de la complexité du péril modélisé, ils restent des représentations du monde physique et peuvent donc être testés à différents niveaux pour s'assurer qu'ils fournissent des mesures de risque fiables. L'approche de ces tests est similaire à l'approche utilisée pour d'autres risques, en ce sens que le modèle doit être calibré et validé par rapport aux données historiques. Ce processus peut être particulièrement compliqué dans les économies émergentes et en développement (EMDE), où les données historiques sont souvent limitées.

Lorsque des données sont disponibles, le modèle doit être validé à la fois au niveau des composantes individuelles (par exemple, en comparant les données modélisées et historiques pour la gravité des secousses du sol, etc.) et au niveau des résultats globaux (par exemple, en comparant la population touchée lors d'événements historiques à la population estimée par le modèle).

### Les tremblements de terre sont-ils associés au changement climatique ?

La plupart des tremblements de terre sont d'origine géologique et ne sont donc pas déclenchés par le changement climatique. À long terme, cependant, le changement climatique et l'élévation du niveau de la mer qui en découle peuvent avoir un impact sur les risques en cascade tels que les tsunamis déclenchés par un tremblement de terre, car l'élévation du niveau de la mer peut augmenter les niveaux d'inondation par tsunami. Le changement climatique peut également augmenter le risque qu'un tremblement de terre déclenche des dangers en cascade. Par exemple, de fortes pluies peuvent augmenter la probabilité que des glissements de terrain se déclenchent et peuvent également augmenter le risque de liquéfaction. En d'autres termes, les risques composés peuvent augmenter en raison du changement climatique.

## Liste de lecture

Grossi, P., et H. Kunreuther, éd. 2005. Modélisation des catastrophes : une nouvelle approche de la gestion des risques. Springer.

Silva, Vitor, Helen Crowley, Kishor S. Jaiswal, Ana Beatriz Acevedo, Massimiliano Pittore et Murray Journey. 2018. « Élaboration d'un modèle mondial de risque de tremblement de terre ». [https://www.researchgate.net/publication/326426092\\_Developing\\_a\\_Global\\_Earthquake\\_Risk\\_Model/link/5b4ce9050f7e9b240fe4f24c/download?\\_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn19](https://www.researchgate.net/publication/326426092_Developing_a_Global_Earthquake_Risk_Model/link/5b4ce9050f7e9b240fe4f24c/download?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn19).

Smith, W. D., A. B. King et W. J. Cousins. 2004. « Évaluation du risque de tremblement de terre à des fins d'assurance. » <https://db.nzsee.org.nz/2004/Paper24.pdf>.