



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Limites des chroniques historiques</b>	<b>5</b>
2.1	Tendance dans la fréquence des catastrophes . . . . .	5
2.2	Données historiques disponibles . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Implémentation d'une procédure d'estimation des pertes dues à un séisme</b>	<b>7</b>
3.1	Logiciels d'estimation des pertes sismiques existants . . . . .	7
3.2	Comparaison des logiciels . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Modélisation de l'aléa sismique</b>	<b>10</b>
4.1	Situation tectonique du Japon . . . . .	11
4.2	Caractérisation d'une source de séismes . . . . .	12
4.2.1	Typologie des séismes . . . . .	14
4.2.2	Loi de survenance d'un séisme . . . . .	14
4.2.3	Magnitude . . . . .	16
4.2.4	Géométrie des sources . . . . .	18
4.3	Évaluation du mouvement à la surface . . . . .	20
4.3.1	Atténuation des ondes sismiques dans le sous-sol . . . . .	20
4.3.2	Effets de site . . . . .	21
4.3.3	Variabilité de l'intensité . . . . .	22
4.3.4	Intensité ressentie . . . . .	23
<b>5</b>	<b>Modélisation du risque</b>	<b>24</b>
5.1	Exposition . . . . .	24
5.2	Dégâts causés aux bâtiments . . . . .	27
5.2.1	Bâtiments endommagés . . . . .	28
5.2.2	Effondrement des bâtiments . . . . .	29
5.3	Estimation du nombre de victimes . . . . .	30
5.3.1	Modèle analytique . . . . .	31
5.3.2	Modèle empirique . . . . .	32
5.3.3	Autres facteurs influençant la mortalité . . . . .	33
5.4	Estimation des pertes du portefeuille . . . . .	34
<b>6</b>	<b>Cohérence et calibration du modèle</b>	<b>35</b>
6.1	Fréquence des séismes . . . . .	35
6.2	Simulation d'évènements passés . . . . .	36
6.2.1	Cartes d'isoséistes . . . . .	38
6.2.2	Nombre de victimes . . . . .	40
6.3	Etude des résidus . . . . .	42
6.3.1	Etude du biais . . . . .	42
6.3.2	Normalité des résidus . . . . .	43
<b>7</b>	<b>Estimation de la distribution des pertes</b>	<b>44</b>
7.1	Générateur de scénario . . . . .	44
7.2	Distribution des pertes humaines . . . . .	44
7.3	Cadre assurantiel . . . . .	44

7.4 Influence de la répartition du portefeuille . . . . .	44
<b>Bibliographie</b>	<b>45</b>
<b>Annexes</b>	<b>49</b>

# 1 Introduction

En plus d'être des événements marquants pour les populations touchées, les catastrophes sont caractérisées par la confrontation d'un phénomène aléatoire extrêmement rare avec une intensité potentiellement gigantesque et d'un territoire peuplé. Selon le centre de recherche sur l'épidémiologie des catastrophes (CRED), pour être considéré comme une catastrophe, un événement doit avoir entraîné le décès d'au moins 10 personnes, ou affecté un minimum de 100 personnes, ou déclenché un état d'urgence ou un appel à l'aide internationale dans les pays sinistrés.

Bien que les leçons apprises du passé et la technologie permettent de mieux se préparer contre ces événements, la concentration des populations dans des zones à risque a conduit à une augmentation du nombre annuel moyen de catastrophes naturelles de 60% sur la période 1980 - 2000 selon le réassureur Munich Re ainsi que des pertes économiques et humaines induites. Les catastrophes géophysiques (séisme, éruption volcanique) et leurs conséquences (tsunami, glissement de terrain, incendie) sont, comme le montre la Figure 1, parmi les plus lourdes en conséquences, faisant 23 000 victimes en moyenne par an depuis 1900<sup>1</sup>.

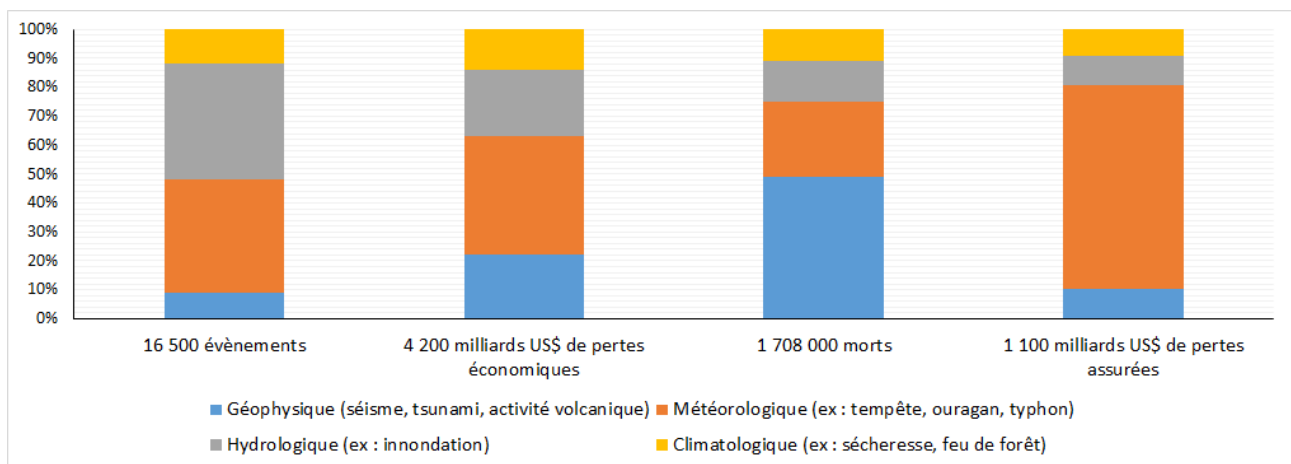


FIGURE 1 – Catastrophes naturelles dans le monde depuis 1980 (Munich 2015)

L'objectif de ce mémoire est d'estimer le capital économique relatif au risque de tremblements de terre pour un portefeuille de polices d'assurance vie au Japon, payant un capital au(x) bénéficiaire(s) en cas de décès de l'assuré dans le cadre de la réglementation Solvabilité II. Nous chercherons donc à estimer la distribution du nombre de décès annuels causés par des séismes. Les exigences en capital peuvent ensuite se déduire du quantile à 99,5% de cette distribution, du taux de pénétration du portefeuille dans la population totale Japonaise et des sommes assurées. Notre méthodologie peut facilement être affinée par un assureur disposant de plus amples informations sur ses assurés (lieu de résidence, de travail, âge).

Causés par le déplacement relatif permanent des plaques tectoniques, les déplacements brutaux de roches appelés séismes sont, encore aujourd'hui, imprévisibles. Cependant, nous verrons que les progrès de la sismologie permettent de mieux représenter le risque sismique que les informations dont nous disposons sur les catastrophes passées. Les recherches sponsorisées par les *Headquarters for Earthquake Research Promotion* (HERP), et librement accessibles sur le

1. Selon la base de données *Emergency Events Database* maintenue par le CRED.

site Web du *National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention* (NIED) seront utilisées dans ce mémoire. Bien que leurs survenances soient intimement liées à celle des séismes, nous ne modéliserons pas les effets secondaires des séismes (tsunamis, éruptions volcaniques, glissements de terrain, incendies) qui nécessiteraient des études spécifiques <sup>2</sup>.

Les conséquences d'un séisme sont multiples et peuvent se classer en deux catégories : les pertes économiques (totales ou assurées) et les pertes sociales (nombre de blessés, de décès ou de personnes ayant perdu leur domicile suite à un séisme). Des modèles d'estimation des pertes suite à un séisme sont développés et utilisés par différents acteurs poursuivant différents objectifs et partageant plus ou moins leur méthode et les données utilisées. Après une brève revue des méthodologies existantes qui permettra de positionner notre étude par rapport à l'état de l'art, nous présenterons une procédure simple et applicable à toutes les régions du monde d'estimation des décès causés par un séisme à partir exclusivement de données publiques gratuites et facilement accessibles notamment la *Global Exposure Database* pour les données d'exposition et le module d'ingénierie des bâtiments du modèle de pertes causées par un séisme *Hazus* pour les courbes de fragilité et les taux de mortalité. Enfin, nous verrons comment son utilisation permet à un assureur de calculer son capital économique.

2. Ces effets secondaires sont plus rares que les séismes mais, lorsqu'ils se produisent, ils sont souvent responsables de la majorité des décès d'où la nécessité d'une modélisation spécifique.

## 2 Limites des chroniques historiques

Une approche actuarielle classique serait d’extrapoler les événements observés passés pour en déduire le risque dans le futur. En général, les primes de polices d’assurance sont ainsi calculées en appliquant la loi des grands nombres à un large échantillon de données. Cette approche suppose que les événements futurs seront régis par la même dynamique que les événements passés. L’hypothèse semble raisonnable concernant les catastrophes naturelles qui sont régies par les lois quasi-immuables de la nature. Pour les tremblements de terre en particulier, un modèle fréquence-coût, calibré sur l’historique, devrait donc être capable de représenter fidèlement le risque de catastrophe sismique. Toutefois, la mise en place d’une telle modélisation soulève plusieurs difficultés.

### 2.1 Tendance dans la fréquence des catastrophes

Selon Munich Re, le nombre de catastrophes naturelles dans le monde a plus que triplé entre 1980 et 2016 sans que l’environnement ne soit responsable de cette tendance<sup>3</sup> et malgré les apports de la technologie (bâtiments plus résistants aux séismes, populations mieux informées sur les risques encourus, mieux préparées à réagir en cas d’évènement extrême). Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette augmentation (Jennings 2011).

- Les événements désastreux ne peuvent être comptabilisés que s’ils sont répertoriés et l’élan global pour mieux recenser les catastrophes implique une augmentation artificielle du nombre de catastrophes. Cependant, les événements considérés comme majeurs, c’est-à-dire les événements ayant affectés au moins 250 000 personnes, sont correctement répertoriés depuis 1980 tandis que leur nombre a également crû sur la même période.
- La population mondiale totale grandissant, l’humanité est nécessairement plus exposée aux catastrophes.
- Une vision plus fine (Risk Management Policies 2006) consiste à dire que la population a augmenté dans des zones où le risque de catastrophe est grand (au travers de l’urbanisation par exemple).

Bien que les catastrophes sismiques ne soient pas la principale source de l’augmentation (leur nombre augmente d’environ 1% par an), une loi de fréquence calibrée sur l’historique devrait prendre en compte cette dépendance temporelle sous peine d’être biaisée.

### 2.2 Données historiques disponibles

Plusieurs catalogues d’évènements historiques recensent les catastrophes sismiques. Nous retenons trois catalogues libres d’accès et réputés fiables afin de les comparer. La *Emergency Event Database* (EM-DAT, Guha-Sapir et al. 2015) répertorie plus de 22 000 catastrophes naturelles et anthropiques survenues dans le monde depuis 1900. Elle est maintenue par le centre de recherche sur l’épidémiologie des catastrophes (CRED) situé à l’université catholique de Louvain. La *Significant Earthquake Database* (NGDC, National Geophysical Data Center 2017), maintenue par le centre américain de données géophysiques recense plus de 5 700 séismes survenus dans le monde depuis 2150 avant J.C. Enfin, le *Catalog of Damaging Earthquakes in the World* collecté par Prof. Utsu (Utsu 2004) regroupe des séismes majeurs survenus durant

3. L’augmentation de la fréquence des catastrophes météorologiques pourrait être en partie due à l’accélération du réchauffement climatique causée par l’activité humaine.

notre ère dont le plus récent remonte à 2013.

Parmi les évènements répertoriés, nous ne sélectionnons uniquement les évènements survenus au Japon et ayant fait au moins une victime.

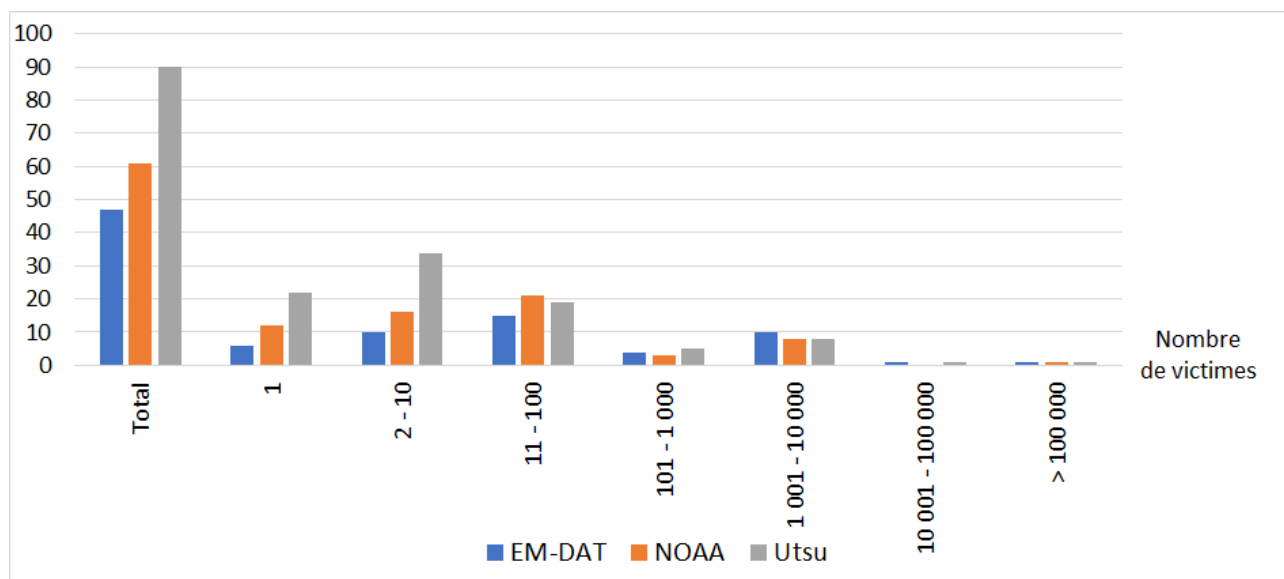


FIGURE 2 – Nombre de séismes meurtriers recensés au Japon (1900 - 2013)

Comme le montre la Figure 2, pour la période allant de 1900 à 2013, les différents catalogues ne s'accordent pas sur le nombre d'évènements meurtriers. De plus, si le catalogue du Prof. Utsu est celui qui comporte le plus d'évènements, le catalogue du CRED contient le plus de séismes avec plus de 1 000 morts. Les différences entre les définitions de catastrophe et la façon de répertorier les évènements causent les différences observées sur la Figure 2. Dans le contexte d'une calibration de loi de sévérité pour les catastrophes sismiques, prenant en compte ou excluant les effets secondaires comme les tsunamis, le choix du catalogue d'évènements utilisé a donc un impact injustifié.

En outre, seulement un ou deux évènements ont engendré plus de 10 000 morts ce qui ne permet pas de garantir la convergence d'une probabilité d'occurrence d'un tel séisme estimée à partir de ces données. Nous pouvons en déduire que ces catalogues ne sont pas adaptés pour estimer la distribution du nombre de décès annuels dus à une catastrophe sismique, surtout si l'on s'intéresse à la queue de cette distribution comme dans notre cas.

Les catastrophes sismiques sont trop rares et mesurées précisément depuis trop peu de temps pour pouvoir constituer une base de données homogène et calibrer une distribution de décès sur un domaine suffisamment grand. De plus, la vulnérabilité des populations évolue rapidement grâce aux leçons apprises du passé et il est vraisemblable que si un évènement passé se reproduisait à l'identique aujourd'hui, il aurait un impact bien moins important.

Dans GIROJ (2014), d'autres indices de la non applicabilité de la loi des grands nombres au risque sismique pour des problématiques assurantielles sont présentés comme le fait que la fréquence historique moyenne de séismes destructeur soit inférieure à un tandis que jusqu'à six séismes se sont déjà produits en une année.

### 3 Implémentation d'une procédure d'estimation des pertes dues à un séisme

Une catastrophe sismique est le résultat de la combinaison de quatre facteurs (Paz 2012) dont la survenance d'un séisme de forte magnitude (et relativement peu profond) qui puisse endommager les constructions et une zone urbaine densément peuplée proche car à de trop grandes distances les ondes sismiques sont atténuées et deviennent inoffensives pour les constructions. De plus, la sévérité de la catastrophe dépend du niveau de développement économique de la région (qui conditionne la vulnérabilité des constructions) et du degré de préparation de la population à réagir lors de tels évènements.

#### 3.1 Logiciels d'estimation des pertes sismiques existants

Actuellement, plusieurs logiciels proposent à leurs utilisateurs, à travers une interface graphique, d'estimer les pertes étant donné un séisme. Un large aperçu des logiciels existants est disponible dans Daniell (2009a) et Spence et So (2011). Ils poursuivent des objectifs différents en fonction des utilisateurs auxquels ils sont destinés : les pouvoirs publics souhaitant anticiper les catastrophes dans la mise en place d'une politique d'urbanisation, les services de secours qui, à la suite d'un évènement majeur, cherchent à évaluer rapidement son ampleur et les lieux d'intervention prioritaires et enfin les assureurs pour des problématiques de tarification ou de gestion des risques.

Certains sont des logiciels libres gratuits<sup>4</sup> que l'on peut trouver facilement, avec le code source associé, sur la toile ou en envoyant simplement une demande à ses développeurs comme *Global Earthquake Model* (GEM, Crowley et al. 2011, Silva et al. 2014), *Displacement-Based Earthquake Loss Assessment* (DBELA, Helen Crowley et al. 2004, Calvi et al. 2006, Bal et al. 2008), *Earthquake Loss Estimation Routine* (ELER, Demircioğlu et al. 2010) et *Comprehensive Approach to Probabilistic Risk Assessment* (CAPRA, Cardona et al. 2010).

D'autres au contraire sont des logiciels propriétaires mais fournissent gratuitement une documentation détaillée comme *Hazard U.S.* (Hazus, Kircher et al. 2006) initialement conçu pour les États-Unis il a inspiré plusieurs autres modèles par la suite (par exemple *HAZ-Taiwan* pour Taiwan, *Seismic Loss Estimation using a logic tree Approach*/SELENA pour l'Europe du Nord, *Mid America Earthquakes visualization*/MAEViz pour le centre des États-Unis et *Earthquake Risk Management*/EQRM pour l'Australie), *Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response* (PAGER 2012) et *QUAKELOSS* de la *World Agency of Planetary Monitoring and Earthquake Risk Reduction* (WAPMERR, Trendafiloski et al. 2011).

Les assureurs, y compris certaines entités du groupe AXA, utilisent quant à eux des logiciels privés développés par des sociétés de service qui proposent seulement une documentation très limitée au public comme AIR Worldwide (Verisk Analytics), Risk Management Solutions (Daily Mail and General Trust), EQECAT (CoreLogic) et Atkins (SNC-Lavalin). Des échanges avec des utilisateurs lors de la rédaction de ce mémoire ont cependant montré que leur fonctionnement est similaire. Le coût d'utilisation de tels logiciels est souvent très élevé.

4. Leur utilisation nécessite néanmoins parfois la détention d'une licence de logiciels utilisables dans le domaine des systèmes d'information géographique (SIG) comme ArcGIS ou l'utilisation de langages de programmation propriétaires comme MATLAB.



### 3.2 Comparaison des logiciels

Outre le degré de partage des connaissances, ces différentes implémentations se distinguent notamment de par la région à laquelle ils sont applicables (rarement le monde entier), les ressources technologiques (langage de programmation, système d'exploitation nécessaire au fonctionnement et compromis entre précision et temps d'exécution), le choix de modélisation de la vulnérabilité des bâtiments et les effets secondaires des séismes considérés (répliques, incendie, glissement de terrain, liquéfaction, tsunami). Par simulation d'évènements passés à l'aide de différents logiciels, les pertes prédites et réelles peuvent être comparées.

Dans Salgado et al. (2014), le séisme de Lorca en Espagne (2011) est simulé sur la plateforme CAPRA. Les parts des bâtiments intacts, habitables, sans et avec dommages structuraux et devant impérativement être détruits observées après le séisme sont comparées avec les prédictions du logiciel. Les prédictions sont similaires aux valeurs observées à l'exception des bâtiments devant impérativement être détruits. Nous verrons que la qualité de cette prédiction est cruciale dans notre contexte car elle est très liée au nombre de décès. Dans Spence et So (2011), les modèles WAPMERR et PAGER sont comparés au regard de quatre séismes survenus en 2010 : Haïti M7, Chili M8.8, Qinghai M6.9 et Darfield M7. Une partie des résultats sont reproduits dans la Table 1.

TABLE 1 – Comparaison du nombre de décès prédit et observé (Spence et So 2011)

		Haïti M7	Chili M8.8	Qinghai M6.9	Darfield M7
WAPMERR	Minimum	2 000	300	200	0
	Médiane	4 500	1 100	894	
	Maximum	10 000	4 000	4 000	100
PAGER	Minimum	2 700	40	40	0
	Médiane	165 000	1 179	445	0
	Maximum	500 000	127 000	5 300	0
Observé		316 000	399	2 698	0

Lorsque l'intersection des régions qu'elles couvrent est non vide, les méthodologies peuvent être comparées en simulant un même scénario sismique. Dans Daniell (2009b), les logiciels SELENA et des versions adaptées de Hazus et DBELA sont comparés pour un scénario de séisme à Istanbul. Hazus prédit environ 50 000 morts, deux fois plus que SELENA, tandis que DBELA estime que le séisme causerait 30 000 décès.

Le principal point commun est la décomposition de leur procédure en quatre composants (Crowley et Bommer 2006) :

**Perte = Aléa Sismique \* Vulnérabilité \* Exposition \* Dommages → Pertes**

où Dommages → Pertes représente la conversion des dommages causés aux bâtiments en pertes pécuniaires.

Pour chacun de ces composants, il existe une variété de modélisations possibles ce qui explique la multitude de logiciels tels que ceux mentionnés précédemment et les grandes différences entre les nombres de décès estimés pour un même séisme. Les choix reposent sur des critères d'adéquation ou de meilleure représentation de l'activité sismique de la région étudiée et de faisabilité en fonction des données disponibles. Ces mêmes critères ont guidé l'élaboration du modèle décrit dans la suite de ce mémoire, développé à l'aide du langage de programmation

Python<sup>5</sup> en concomitance du logiciel QGIS<sup>6</sup> pour la visualisation.

L'aléa sismique représente la probabilité que le sol tremble avec une certaine intensité au niveau d'un lieu particulier. Sa modélisation donne lieu à l'élaboration de cartes d'évaluation du risque sismique. Ce module constitue la plus grande valeur ajoutée des modèles d'estimation des pertes sismiques par rapport à une pure extrapolation des chroniques historiques car il permet la constitution d'un ensemble continu, infini, de scénarios.

5. Python Software Foundation

6. QGIS Development Team (2009)

## 4 Modélisation de l'aléa sismique

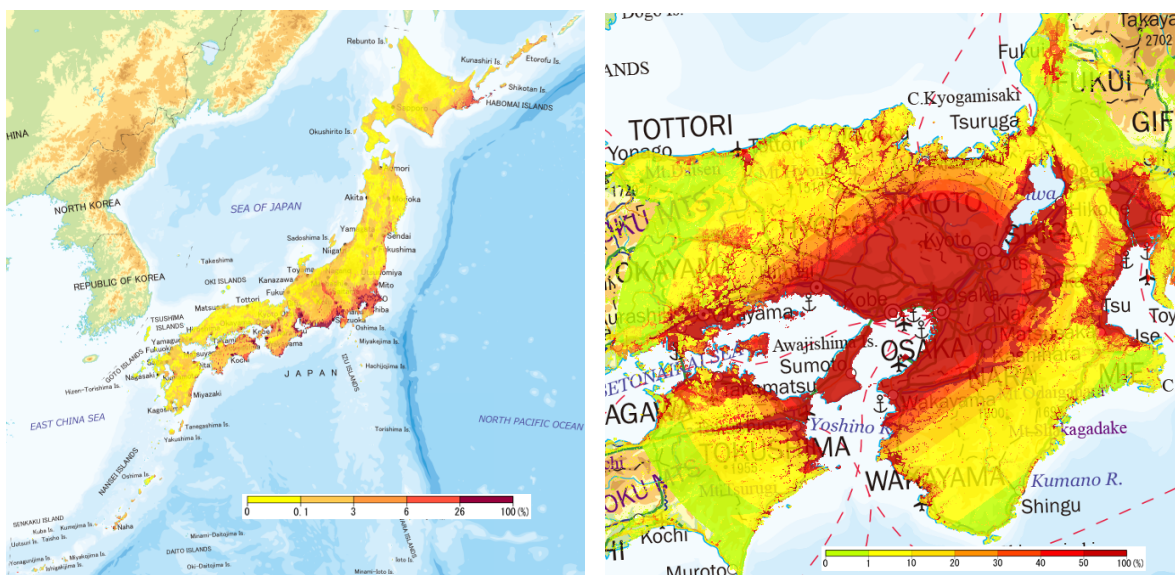
À la suite du grand séisme de Kobe de 1995 qui fit plus de 6 400 morts, le parlement Japonais (Diète du Japon) a voté la même année une loi pour promouvoir la recherche pour la prévention des catastrophes géologiques (*the Act on Special Measures concerning Earthquake Disaster Management*). Cette loi comprend l'établissement d'une agence gouvernementale spécifique, le HERP (*Headquarters for Earthquake Research Promotion*), aujourd'hui rattachée au ministère Japonais de l'éducation, la culture, la science et la technologie. Responsable de la coordination entre les différentes organisations gouvernementales et les centres de recherche, il dispose d'un organe responsable de la politique de promotion de la recherche et d'un organe responsable de l'évaluation du risque sismique, l'ERC (*Earthquake Research Committee*).

Les missions de l'ERC comprennent la réalisation de cartes basées sur les résultats des dernières recherches, observations et prédictions sur l'activité sismique au Japon représentant une évaluation du risque sismique. Ces cartes furent publiées pour la première fois en 2005 et sont depuis lors mises à jour annuellement. Depuis 2009, les niveaux de risque sont donnés pour une carte décomposée en cellules de 250m de côté. Le NIED (*National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention*), une agence semi-officielle, indépendante du gouvernement nippon, participe également à l'amélioration de ces cartes (Fujiwara et al. 2006).

Les cartes d'évaluation du risque sismique, probabilistes ou déterministes, consiste à soit pour une intensité de mouvement du sol donnée  $y$ , représenter la probabilité de dépassement de ce seuil sur une période de temps  $t$  pour chaque cellule :

$$y \mapsto \mathbb{P}(Y > y, t)$$

soit pour une probabilité de dépassement donnée, représenter l'intensité-seuil correspondante. Les cartes déterministes considèrent qu'un ou plusieurs séismes se produisent dans un lieu et avec une intensité donnée (voir Figure 3b). Les cartes probabilistes considèrent l'ensemble des séismes qui pourraient affecter la région étudiée et comprend donc la probabilité de survenance des séismes (voir Figure 3a).



(a) Probabilité de dépassement de l'accélération du sol de  $3,15 \text{ m/s}^2$  à horizon 30 ans

(b) Probabilité de dépassement de l'accélération du sol de  $1,4 \text{ m/s}^2$  pour un séisme de magnitude 7,3 dans la région de Kobe

FIGURE 3 – Cartes d'évaluation probabiliste et déterministe du risque sismique (Fujiwara et al. 2006)

Malheureusement, ces cartes ne peuvent pas être utilisées *en l'état* pour estimer la distribution du nombre annuel de victimes de séismes (Wyss et al. 2012). En revanche, la méthodologie de l'ERC et du NIED pour réaliser ces cartes est décrite dans Fujiwara et al. (2009) et toutes les données nécessaires à leur réalisation peuvent être téléchargées sur une plateforme dédiée à l'information sur le risque sismique au Japon : *Japan Seismic Hazard Information Station* (J-SHIS). Ces informations sont choisies pour être l'ingrédient de base de notre module d'aléa car nous pensons qu'elles sont les plus précises, récentes et exhaustives disponibles actuellement concernant l'activité sismique au Japon.

## 4.1 Situation tectonique du Japon

Le Japon est situé dans une des zones sismiques les plus actives du monde. Les îles qui composent son territoire sont à cheval sur la plaque Eurasiatique et la plaque Nord Américaine (aussi appelée plaque d'Okhotsk). Elles sont bordées par deux plaques océaniques : la plaque Pacifique à l'est et la plaque des Philippines au sud.



FIGURE 4 – Plaques tectoniques autour du Japon

Du fait du mouvement des plaques, on observe plusieurs phénomènes de subduction aux frontières entre ces plaques : les plaques océaniques (plus denses) Pacifique et des Philippines glissent sous la plaque Nord Américaine le long, respectivement, de la fosse japonaise (dont la partie la plus au nord est aussi appelée fosse des Kouriles) et de la fosse Sagami. En outre, la plaque des Philippines glisse sous la plaque Eurasiatique le long de la fosse Nankai. Dans la région de Tokyo, la plaque des Philippines plonge sous la plaque Pacifique qui elle-même glisse sous la plaque nord-américaine. La capitale, Tokyo, est donc située à l'intersection entre 3 plaques tectoniques, ce qui en fait une ville fortement exposée au risque sismique et une singularité mondiale. Les fosses sont larges de plusieurs centaines de kilomètres et plongent jusqu'à 100 km sous la surface. Les plaques se déplacent vers le nord-ouest à une vitesse comprise entre 5,6 cm/an et 10,2 cm/an par rapport à l'Afrique.

Ces fosses font partie d'un plus grand ensemble géologique appelé l'anneau de feu qui se prolonge au nord de la fosse des Kouriles le long de la côte sud de l'Alaska avant de descendre le long de la côte Pacifique jusqu'au Chili et au sud de la fosse des Philippines jusqu'aux îles Tonga et la Nouvelle Zélande. Les plaques océaniques peuvent glisser sous les plaques continentales sans générer d'ondes sismiques observables à la surface. Ce type de mouvement est appelé déplacement asismique. Dans le cas où les frottements à l'interface entre les plaques sont trop importants, l'énergie générée s'accumule pendant plusieurs centaines d'années et est relâchée lors des séismes en *déchirant* une partie de la croûte terrestre (phénomène de rupture).

## 4.2 Caractérisation d'une source de séismes

Les séismes se produisent aux niveau d'entités géologiques souvent bien connues des scientifiques appelées failles sismiques. Des signes observables à la surface et les enregistrements d'événements passés permettent de les identifier. Toutefois, certains séismes se produisent à des endroits où aucune faille sismique n'a été découverte. Ces séismes sont alors attribués à des entités géologiques fictives qui sont regroupés avec les failles sous l'appellation de sources de séismes. La décomposition de l'activité sismique en sources conditionne la récurrence des séismes : une fréquence est associée à chaque source. Chaque source peut générer un ensemble de séismes eux-mêmes décrits par :

- un type
- une magnitude
- une surface de rupture

Nous reprenons la décomposition de l'activité sismique au Japon en 37 224 sources sismiques distinctes, dont la probabilité de rupture à horizon 30 ans est non nulle, utilisée pour réaliser les cartes d'aléa (voir Figure 5). D'autres facteurs, que nous ne considérerons pas, comme la directivité de la rupture influencent, dans une moindre mesure, l'impact d'un séisme.

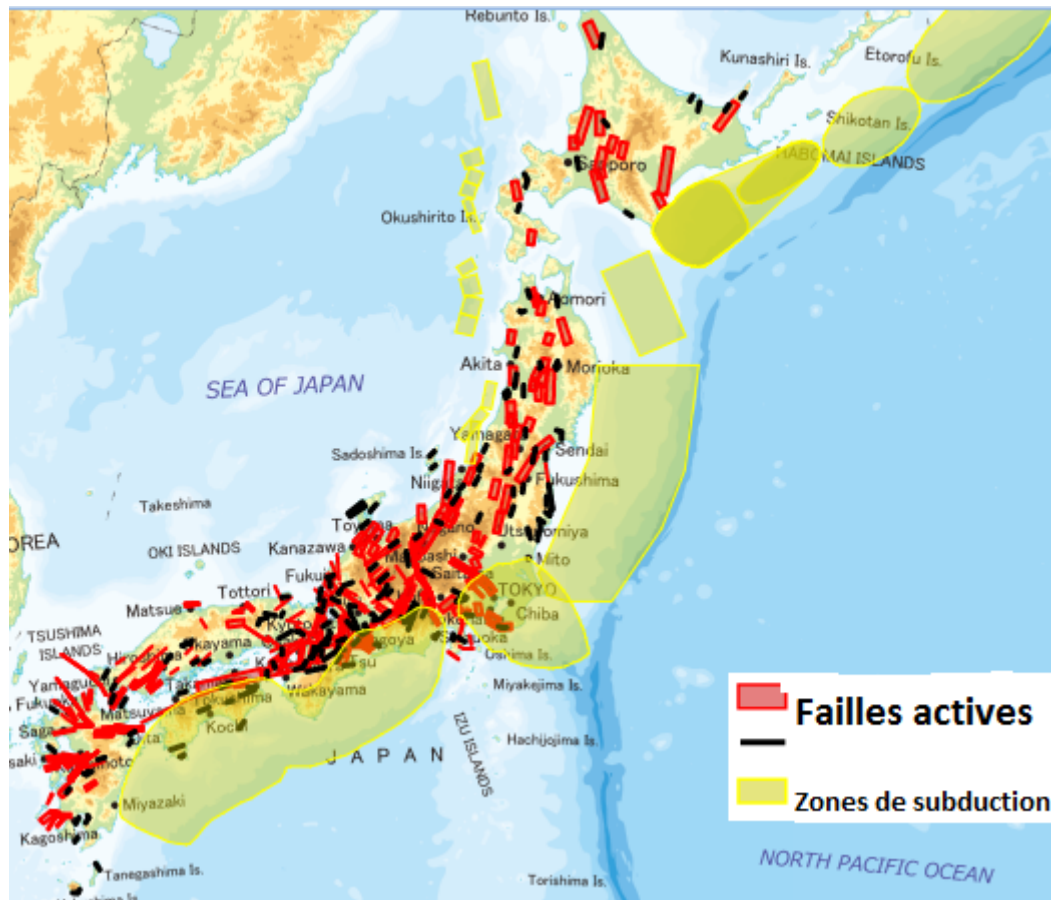


FIGURE 5 – Sources sismiques au Japon (Source : J-SHIS)

### 4.2.1 Typologie des séismes

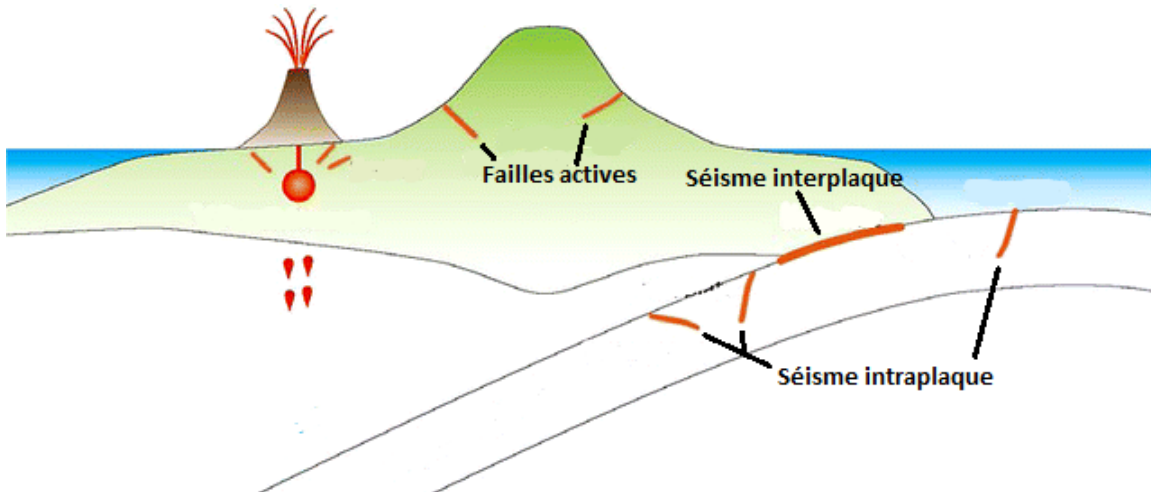


FIGURE 6 – Types de séismes dans et autour du Japon

Lorsque les contraintes accumulées au niveau d'une interface géologique deviennent trop importantes par rapport à la rigidité des roches, une rupture survient. Ces ruptures peuvent avoir lieu, comme le montre la Figure 6, dans une plaque continentale au niveau des failles actives, dans une plaque océanique (séismes intraplaque) ou encore à l'interface entre une plaque océanique et continentale (séisme interplaque). Les séismes qui sont susceptibles d'être générés par les failles actives sont généralement plus rares et de magnitude plus faible par rapport aux séismes survenant dans des zones de subduction (interplaques ou intraplaques). Cependant, ils sont moins profonds et à proximité des zones peuplées ce qui les rend également dangereux.

### 4.2.2 Loi de survenance d'un séisme

Les technologies de pointe actuelles permettent de détecter un séisme quelques secondes avant qu'il ne touche des zones habitées et de déclencher un système d'alerte précoce permettant aux chauffeurs de train de s'arrêter leur véhicule ou aux chirurgiens d'interrompre leur opération (Hoshiba et al. 2008). Un tel système utilisant les stations sismique de l'agence météorologique Japonaise (JMA) est en place au Japon (Kamigaichi 2004). En revanche, il n'est pas encore possible de prédire la date ou l'intensité du prochain séisme. Toutefois, l'observation de signes annonciateurs à la surface et des stigmates d'événements passés, permettent de borner la durée avant le prochain séisme et sa magnitude.

La connaissance de la vitesse de déplacement des plaques tectoniques et des propriétés des roches où se trouvent les sources permet d'avoir une idée de la vitesse d'accumulation des contraintes ainsi que de la durée entre deux ruptures de la même source. Cependant, les déplacements asismiques induisent beaucoup d'incertitude dans ces estimations. On peut alors déduire de plus amples informations sur le processus de survenance d'un séisme pour ces sources dont certaines traces peuvent être observées à la surface. Pour ces raisons, il est donc plus adapté de modéliser l'occurrence des séismes *par source* plutôt que l'occurrence des séismes *en général* au Japon.

Pour chaque source, le nombre de séismes survenus est un processus  $N_t$ . On se place dans un espace de probabilité filtré  $(\Omega, \mathcal{F}, \{\mathcal{F}_t, t \in \mathbb{N}^*\}, \mathbb{P})$  où  $(N_t)$  est adapté à la filtration  $(\mathcal{F}_t)$ , *i.e.*  $\forall t$ ,

$N_t$  est  $\mathcal{F}_t$ -mesurable. Les résultats d'études spécifiques à chaque source, répertoriés par l'ERC, ont déterminé le modèle le plus vraisemblable (d'après le critère de l'AIC par exemple) pour le processus d'occurrence des séismes. On exploite ces résultats pour obtenir une probabilité de rupture à très court terme (un an). La période de retour moyenne pour une source sismique étant de l'ordre de 10 000 ans on suppose qu'une même source ne peut générer qu'au plus un séisme à l'horizon court terme :

$$\mathbb{P}(N_t = 1) \approx \mathbb{P}(N_t > 0)$$

**Processus de Poisson** Soit  $S_n$  le temps entre le  $n$ -ième et le  $n + 1$ -ième séisme d'une source, on suppose que  $(S_n)$  est une suite de variables aléatoires indépendantes de même loi exponentielle d'espérance  $\frac{1}{\lambda}$ .

$$\mathbb{P}(S_n \leq t) = (1 - e^{-\lambda t}) \mathbb{1}_{t \geq t_0}$$

Soit  $T_n = \sum_{i=1}^n S_i$ , on a alors  $N_t = \sup(n/T_n \leq t)$ .  $(N_t)_{t \geq t_0}$  est donc un processus de Poisson,  $N_t \sim \mathcal{P}(\lambda(t - t_0))$  :

$$\mathbb{P}(N_t = k) = e^{-\lambda(t-t_0)} \frac{(\lambda(t-t_0))^k}{k!}$$

Dans ce cas, on constate que les accroissements de  $N_t$  sont supposés indépendants, ce qui contredit le principe d'accumulation et de relâchement des contraintes décrit plus haut : si une source génère un séisme une année, un séisme de la même source l'année suivante est beaucoup moins vraisemblable.

Grâce aux recherches de l'ERC, à chaque source est associée un intervalle de temps moyen,  $\mu$ , entre deux ruptures qui vérifie donc :

$$\mu = \frac{1}{\lambda}$$

Finalement, on s'intéresse à la probabilité d'occurrence d'au moins un séisme entre aujourd'hui,  $t_0$ , et  $t$  :

$$\mathbb{P}(N_t > 0) = 1 - \mathbb{P}(N_t = 0) = e^{-\lambda(t-t_0)}$$

**Premier passage d'un mouvement brownien** Les séismes historiques, s'ils sont suffisamment récents pour que les stations aient pu le mesurer précisément, peuvent être attribué à une source. De plus, les marques de séismes passés sont encore visibles à la surface et la paléosismologie permet d'interpréter ces traces pour en déduire la date du séisme. Pour ces sources on connaît donc, en plus de la période de retour moyenne, la date du dernier évènement. Dans ce cas, le processus de survenance d'un séisme est modélisé comme le premier passage d'un mouvement brownien unidimensionnel ainsi qu'il est décrit dans Matthews et al. (2002).

Soit un processus  $\{X_t, t > 0\}$  à valeurs réelles, continu à droite et partant de 0 ( $X_0 = 0$ ) qui représente l'énergie accumulée au niveau de la source, on suppose l'existence d'un seuil  $a > 0$  tel que la survenance d'un séisme soit équivalent à  $\{X_t > a\}$ .  $T_a = \inf(t > 0, X_t > a)$ , appelé premier temps de passage au seuil  $a$ , est alors un  $(\mathcal{F}_t)$ -temps d'arrêt <sup>7</sup>.

7. En effet, pour tout  $t > 0$ , on a l'identification  $\{T > t\} = \{X_s \leq a, \forall s \leq t\} = \bigcap_{s \in \mathbb{Q}^+, s \leq t} \{X_s \leq a\}$



De plus, on suppose que  $X_t$  est un oscillateur de relaxation brownien :

$$X_t = \lambda t + \sigma W_t$$

où  $\lambda$  est une constante représentant l'accumulation des contraintes provenant du déplacement constant des plaques et  $W_t$  est un mouvement brownien. On peut alors retrouver le temps moyen entre deux ruptures :

$$\mu = \frac{a}{\lambda}$$

On déclare également une mesure de l'apériodicité :

$$\alpha = \frac{\sigma}{\sqrt{\lambda a}}$$

Ce qui nous permet de caractériser entièrement la fonction de répartition de  $T_a$  :

$$F(t) = \Phi(u_1(t)) + e^{2/\alpha^2} \Phi(-u_2(t))$$

où  $u_1(t) = \alpha^{-1}(t^{1/2}\mu^{-1/2} - t^{-1/2}\mu^{1/2})$   
et  $u_2(t) = \alpha^{-1}(t^{1/2}\mu^{-1/2} + t^{-1/2}\mu^{1/2})$

En outre, on connaît le temps  $t_0$  écoulé depuis la dernière rupture de cette source et durant lequel il n'y a pas eu de rupture. La probabilité qu'une rupture survienne entre  $t_0$ , et  $t$  devient :

$$\mathbb{P}(t_0 < T_a \leq t_0 + t | T_a > t_0) = \frac{F(t + t_0) - F(t_0)}{1 - F(t_0)}$$

La modélisation comme premier passage d'un mouvement brownien est préférée au processus de Poisson lorsque des tests de vraisemblance indiquent une meilleure adéquation du modèle. Dans ce cas, les paramètres  $\alpha$  et  $t_0$  sont donnés en plus du temps moyen d'attente entre deux ruptures à l'exception des séismes de magnitude de l'ordre de 8 survenant au niveau de la fosse Sagami. Concernant cette source, l'étude Imoto et Fujiwara (2012) regroupe les résultats de la calibration d'un premier passage de mouvement brownien sur plusieurs catalogues d'événements historiques et préconise de choisir comme paramètres une moyenne des paramètres obtenus pour les différents catalogues pondérés par la log-vraisemblance des modèles calibrés. On retient donc une période de retour moyenne  $\mu = 302.7$ , une apériodicité  $\alpha = 0.38$  et une durée depuis la dernière rupture  $t_0 = 94$  (séisme de Kanto de 1923). Le processus de Poisson peut parfois être choisi par défaut lorsque le nombre de séismes observés pour une source est insuffisant.

**Rupture de multiples segments** L'occurrence de la rupture pour les failles les plus longues est conditionnée par la rupture de chacun de leurs segments indépendamment. La probabilité de survenance d'une rupture sur une faille composée de plusieurs segments est donc le produit des probabilités de chaque segment qui la compose. Puis, la probabilité d'occurrence pour un segment unique, partie d'une faille plus longue, est la probabilité d'occurrence du segment sans tous les autres segments.

### 4.2.3 Magnitude

Une idée reçue est qu'un tremblement de terre fera d'autant plus de victimes que sa magnitude est élevée. La magnitude n'est en réalité qu'une mesure de l'énergie libérée au moment de la rupture sur une échelle logarithmique (lorsque la magnitude augmente de 1, l'énergie libérée est multipliée par 32 environ). Plusieurs échelles existent pour cette mesure notamment : l'échelle

de Gutenberg-Richter, la plus connue, l'échelle de la magnitude des moments, la plus largement utilisée, et l'échelle de l'agence météorologique Japonaise (JMA), utilisée par les stations sismiques japonaises. Certes une magnitude élevée est synonyme d'un séisme important mais encore faut-il que celui-ci survienne à proximité des régions peuplées et suffisamment proche de la surface. La loi de Gutenberg-Richter, paramétrée par 2 constantes  $a$  et  $b$ , permet de lier la magnitude au nombre de séismes de magnitude supérieure survenant durant une certaine période de temps :

$$\log_{10} N_m = a - bm$$

où  $N_m$  est le nombre de séismes de magnitude supérieure à  $m$  durant la période. Le nombre total de séismes (de magnitude supérieure à 0) est donc  $N_0 = 10^a$ . Elle aussi appelé relation fréquence-magnitude. Il apparaît qu'elle fournit des résultats satisfaisants à la fois pour des catalogues de séismes spécifiques à des sources et pour des catalogues de séismes régionaux. En outre, les caractéristiques d'une surface de rupture (longueur, largeur et aire de la faille) permettent de déduire les paramètres  $a$  et  $b$  si le catalogue de la source est insuffisant (Riera et Iturrioz 2012).

On pose  $\beta = b \ln 10$ . Sachant que la source a généré un séisme, la probabilité que sa magnitude  $M$  soit supérieure à  $m$  s'écrit alors comme la fonction de survie d'une loi exponentielle :

$$\mathbb{P}(M \geq m) = \frac{N_m}{N_0} = \exp(-\beta m)$$

Dans la pratique, on souhaite imposer une valeur minimale ( $m_{min}$ ) et/ou maximale ( $m_{max}$ ). La distribution doublement tronquée devient (Kijko et Sellevoll 1989) :

$$\mathbb{P}(M \leq m) = \frac{\exp(-\beta m_{min}) - \exp(-\beta m)}{\exp(-\beta m_{min}) - \exp(-\beta m_{max})}, \quad m_{min} \leq m \leq m_{max}$$

Lorsqu'un seuil n'est pas connu, il suffit de le remplacer par 0 (lorsque  $m_{min}$  est inconnue) ou  $+\infty$  (lorsque  $m_{max}$  est inconnue).

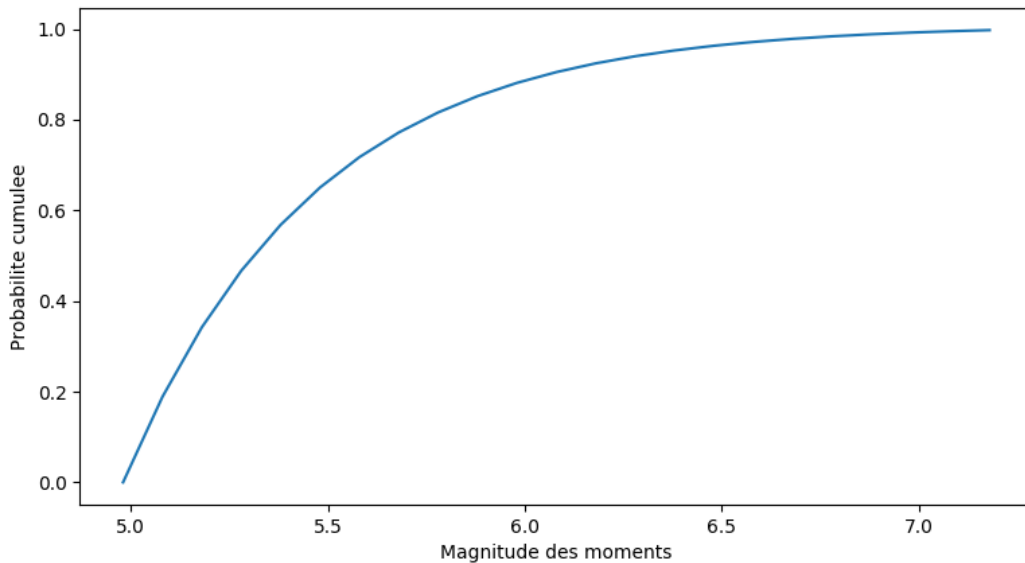


FIGURE 7 – Fonction de répartition d'une loi de Gutenberg-Richter doublement tronquée ( $m_{min} = 4.98$ ,  $m_{max} = 7.32$ ,  $\beta = 2.07$ )

La distribution de la magnitude peut également être discrète. Cela correspond à des sources qui engendrent des séismes caractéristiques. Dans ce cas un séisme peut rompre une surface parmi un nombre fini d'interfaces équiprobables. La magnitude est alors liée aux dimensions de la surface et est précisée dans les paramètres des cartes d'aléa de J-SHIS.

Lorsqu'une magnitude est donnée sur l'échelle JMA, elle se convertit en magnitude des moments grâce à la relation :

$$M_W = 0.78M_J + 1.08$$

où  $M_W$  est la magnitude des moments et  $M_J$  la magnitude sur l'échelle JMA.

#### 4.2.4 Géométrie des sources

Dans les catalogues de séismes historiques, la localisation de la source est le plus souvent décrite par la position d'un point (latitude, longitude, profondeur) du globe appelé hypocentre. Son projeté à la surface est appelé épïcentre. Ses coordonnées sont obtenues par triangulation des ondes observées en différentes stations sismiques lors de l'évènement. Cependant, cette représentation est réductrice, notamment pour les séismes générés par des failles actives situées à l'intérieur des terres. Lors d'une rupture, des ondes sismiques sont émises en tout point de la surface rompue. Si la faille est longue, la distance du site à la surface peut être très différente de la distance du site à un point fixe de la surface. Les dégâts causés par le séisme de Kobe de 1995, le plus important de la deuxième moitié du XX<sup>ème</sup> siècle, surprirent les experts immédiatement après l'évènement. En effet, l'épicentre se situe sous l'île Awaji, sur une faille déjà connue des scientifiques, à 15 km de la ville de Kobe qui aurait dû être épargnée. En réalité, la rupture de la faille située sous l'île Awaji a provoqué une réaction en chaîne et finalement la rupture d'une autre faille, jusqu'alors inconnue, se trouvant directement sous Kobe et prolongeant la faille déjà rompue ce qui explique les dégâts observés.

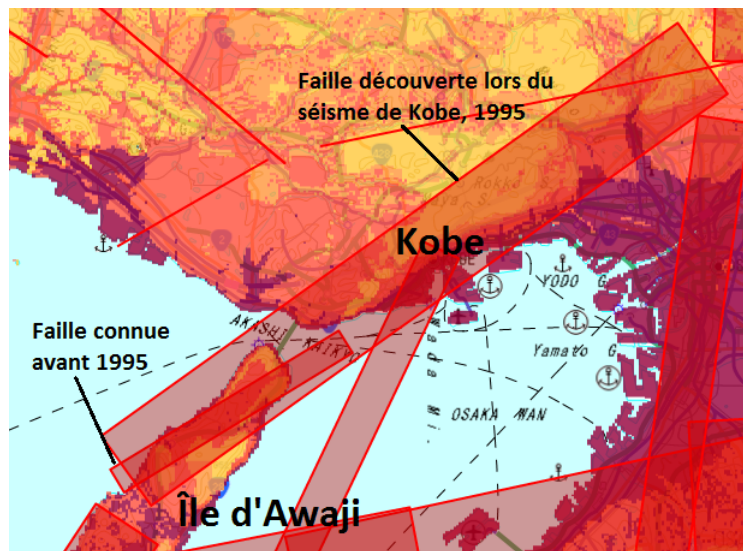
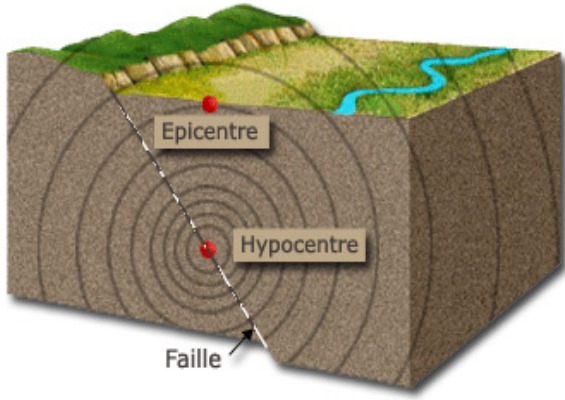


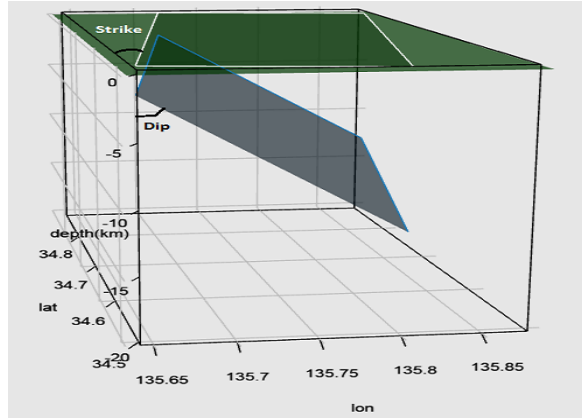
FIGURE 8 – Faille découverte lors du séisme de Kobe

Dans notre catalogue de séismes fictifs, la géométrie de la rupture peut être :

- un plan, un ensemble de plans ou une distribution d'ensembles de plans
- un point ou un nuage de points



(a) Un point



(b) Un plan

FIGURE 9 – Représentation des surfaces de rupture

Lors de l'évaluation de la distance d'un site à la source, on calcule donc la distance d'un point à la surface du globe soit à un polygone en 3 dimensions soit à un autre point. Les coordonnées sont données en degrés de longitude et latitude dans le standard *Japanese Geodetic Datum 2000* établi par la *Geospatial Information Authority of Japan* (GSI). Le centre de ce standard est un point situé à Tokyo (longitude : 139°44' 28.8869" Est, latitude : 35°39' 29.1572" Nord).



FIGURE 10 – Origine des latitudes et longitudes japonaises (Source : GSI)

La relation d'Haversine lie les coordonnées en longitude et latitude de deux points à la surface du globe à la distance qui les sépare.

$$\text{hav}\left(\frac{d}{R}\right) = \text{hav}(lat_2 - lat_1) + \cos(lat_1) \cos(lat_2) \text{hav}(lon_2 - lon_1)$$

où  $R$  est le rayon de la Terre et  $\text{hav}(\theta) = \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{1 - \cos(\theta)}{2}$ .

Pour chaque couple de coordonnées, on calcule la distance du point au méridien et au parallèle passant par le centre du repère et on obtient alors des coordonnées en kilomètres. Pour les plans, on ne connaît que les coordonnées d'un seul point. Les coordonnées des autres points sont déterminées grâce aux indications de pendage (l'angle entre l'axe Sud-Nord et l'horizontale du plan à la surface, le *strike* et l'angle entre la ligne de plus grande pente et la surface terrestre, le *dip*) représentées sur la Figure 9b, la longueur et la largeur du plan. Ce changement de coordonnées permet de calculer la distance du site à la rupture représentée par un point ou un polygone.

### 4.3 Évaluation du mouvement à la surface

Supposons qu’une source génère un séisme, nous cherchons désormais à déterminer l’effet sur les sites à proximité. Il subsiste encore un aléa dans la magnitude du séisme. L’effet sur un site est mesuré par la vitesse et l’accélération maximale sur le sol du site durant le séisme. Soit la position d’une source et d’un site et la magnitude du séisme, des équations d’atténuation permettent de déterminer le mouvement du sol sur le site (vitesse, accélération) en fonction de la distance du site à la source, de la magnitude, de la profondeur du séisme et du type de source.

L’objectif de ce module est de réaliser des cartes d’isoséistes représentant le mouvement maximal, vitesse ou accélération, lors d’un événement sismique en tout point du territoire japonais. Ces cartes permettent ensuite de vérifier la cohérence de notre modélisation avec la réalité. En effet, lors de chaque événement sismique majeur, ces cartes sont produites à l’aune des observations des stations sismiques. Le mouvement du sol est estimé de manière déterministe dans notre modèle mais dans la réalité il est aléatoire ce qui peut expliquer certaines différences entre nos cartes d’isoséistes et l’intensité réellement observées.

#### 4.3.1 Atténuation des ondes sismiques dans le sous-sol

Soit un séisme de magnitude des moments  $M_W$  survenant à une profondeur  $D$ , soit un site à la surface situé à une distance  $X$  de la source, le mouvement maximal  $A$  ( $PV_{30}$  pour la vitesse,  $PA_{30}$  pour l’accélération) 30m sous la surface du site durant la rupture est donné par (Midorikawa et Ohtake 2002, Saburoh Midorikawa et Yu Ohtake 2004) :

$$\begin{aligned}\log_{10} A &= b - \log_{10}(X + c) - kX, \quad D \leq 30\text{km} \\ \log_{10} A &= b + 0.6 \log_{10}(1.7D + c) - 1.6 \log_{10}(X + c) - kX, \quad D > 30\text{km}\end{aligned}$$

où  $b = aM_W + hD + d_i + e$  et  $d_i$  dépend du type de séisme (faille active, interplaque ou intra-plaque).

Les paramètres de l’équation sont donnés dans la Table 2. On représente généralement cette équation en fonction de la distance à la source sur une échelle log-log (voir Figure 11).

Paramètre	$k$	$c$	$a$	$h$	$d_{croule}$	$d_{interplaque}$	$d_{intraplaque}$	$e$
Accélération	0.003	$0.006010^{0.5M_W}$	0.59	0.0023	0.00	0.08	0.30	0.02
Vitesse	0.002	$0.002810^{0.5M_W}$	0.65	0.0024	0.00	0.05	0.15	-1.77

TABLE 2 – Paramètres de l’équation d’atténuation

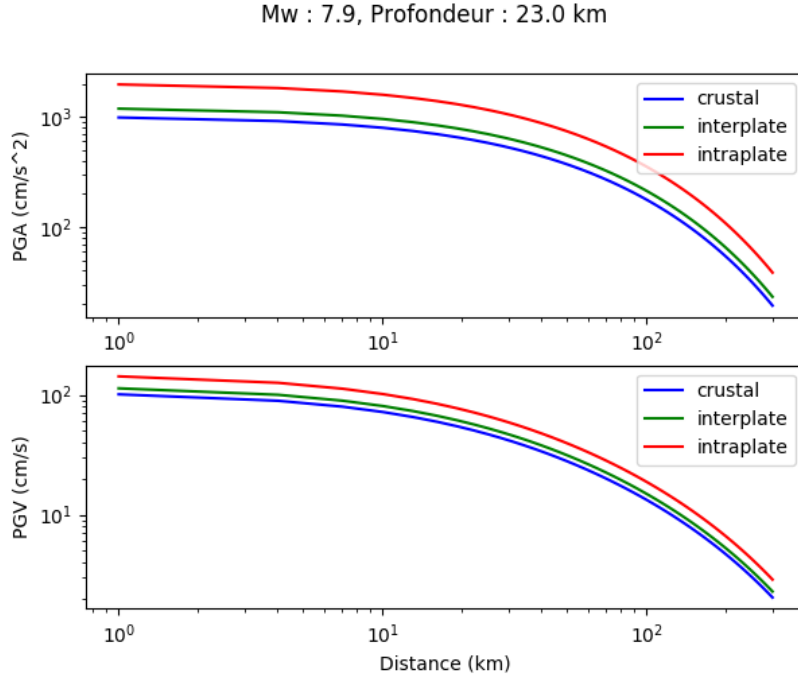


FIGURE 11 – Atténuation des ondes sismique pour un séisme de magnitude 7.9 sur l'échelle des moments

#### 4.3.2 Effets de site

D'après l'équation d'atténuation, pour une rupture donnée, le mouvement maximal du sol ne dépend que de la distance du site à la rupture. Sur les cartes d'isoséistes du sol publiées à la suite d'un séisme, les lignes de niveau devraient donc décrire des figures concentriques autour de la rupture. On remarque cependant que le mouvement maximal indiqué sur les cartes d'isoséistes n'est pas toujours égal pour des sites pourtant situés à égale distance de la rupture. La composition de la couche la plus superficielle de la croûte terrestre influe sur l'amplitude des ondes sismiques à la surface.

Nous modélisons ce phénomène à l'aide de facteurs d'amplification, applicables au mouvement estimé 30m sous la surface du site, qui permettent d'obtenir le mouvement maximal à la surface du site lors de la rupture. La composition des 30 derniers mètres sous la surface est caractérisée par la vitesse moyenne des ondes surfaciques dans cette portion notée  $VS_{30}$ . En exploitant les résultats de Midorikawa (1994), on en déduit les facteurs d'amplification pour la vitesse et l'accélération :

$$\log_{10} R = a \log_{10} VS_{30} + b$$

où  $R$  est le facteur d'amplification.

Paramètre	$a$	$b$
Accélération	-0.47	1.35
Vitesse	-0.66	1.83

TABLE 3 – Paramètres de l'équation d'amplification

On peut désormais estimer le mouvement maximal à la surface, par exemple l'accélération (notée  $PGA$ ), à partir du mouvement maximal 30m sous la surface  $PA_{30}$  obtenus par l'équation

d'atténuation :

$$PGA = PA_{30} \times R$$

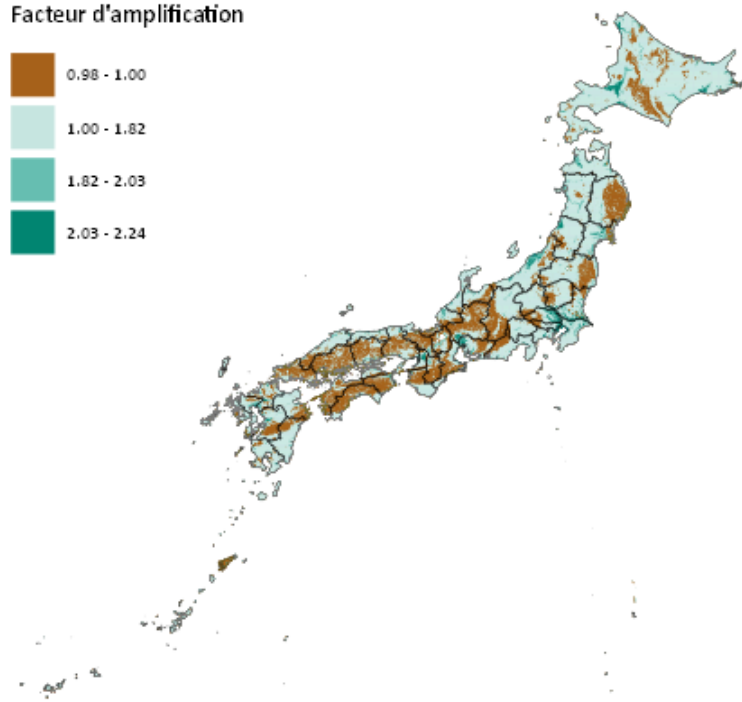


FIGURE 12 – Facteurs d'amplification de l'accélération du sol

### 4.3.3 Variabilité de l'intensité

La valeur de l'intensité que nous venons de calculer est en fait la médiane d'une loi log-normale dont la variance  $\sigma^2$  peut dépendre de la distance du site à la rupture pour les séismes de failles actives ou de la valeur de sa médiane :

$$\text{Pour les failles } \sigma = \begin{cases} 0.23 & \text{si } X \leq 20km \\ 0.23 - 0.03 \frac{\log(X/20)}{\log(30/20)} & \text{si } 20 < X \leq 30km \\ 0.20 & \text{si } X > 30km \end{cases}$$

$$\text{Sinon } \sigma = \begin{cases} 0.20 & \text{si } PGV \leq 25cm/s \\ 0.20 - 0.05 \frac{PGV-25}{25} & \text{si } 25 < PGV \leq 50cm/s \\ 0.15 & \text{si } PGV > 50cm/s \end{cases}$$

La plupart des logiciels cités en Partie3 prennent en compte cette incertitude. Une première façon est de calculer trois valeurs d'intensité : la valeur médiane et les quantiles à 16% et 84% obtenus en ajoutant ou retirant un écart-type. Une deuxième façon est de réaliser un grand nombre de simulations en tirant la valeur de l'intensité à l'aide des paramètres de la distribution log-normale. En réalité, cet aléa constitue la principale source d'incertitude de notre modèle de par les queues épaisses de la loi log-normale.

#### 4.3.4 Intensité ressentie

En plus de la vitesse et de l'accélération maximales observées sur un site lors d'un séisme, l'échelle de Mercalli modifiée (MMI) est une autre mesure de l'intensité sismique basée sur les effets observés, ressentis au niveau du site. L'accélération et la vitesse de déplacement du sol peut être convertie sur l'échelle MMI comme le montre la Table 4.

TABLE 4 – Échelle de Mercalli modifiée

MMI	$PGA$ (g)	$PGV$ (cm/s)	Secousse ressentie	Dommages potentiels
I	$< 0.0017$	$< 0.1$	Aucune	Aucun
II–III	$0.0017 - 0.014$	$0.1 - 1.1$	Faible	Aucun
IV	$0.014 - 0.039$	$1.1 - 3.4$	Légère	Aucun
V	$0.039 - 0.092$	$3.4 - 8.1$	Modérée	Très légers
VI	$0.092 - 0.18$	$8.1 - 16$	Forte	Légers
VII	$0.18 - 0.34$	$16 - 31$	Très forte	Modérés
VIII	$0.34 - 0.65$	$31 - 60$	Sévère	Modérés à lourds
IX	$0.65 - 1.24$	$60 - 116$	Violente	Lourds
X+	$> 1.24$	$> 116$	Extrême	Très lourds

D'après cette échelle, les bâtiments ne subissent aucun dommage lorsque la  $PGA$ , l'accélération maximale, ne dépasse pas 0,039g. Pour des raisons pratiques (mémoire informatique, temps de calcul), le mouvement ne peut être évalué pour tous les sites du Japon pour chaque évènement simulé : il est nécessaire d'établir une règle pour restreindre le nombre de sites pour lesquels les dommages seront évalués. Comme mentionné précédemment, la distance au-delà de laquelle un séisme n'aura pas d'impact en terme de bâtiments détruits et de victimes dépend de plusieurs paramètres. En considérant que les effets de sites peuvent multiplier l'accélération du sol par au plus 2,5 lors du passage des ondes sismiques dans les 30 derniers mètres sous la surface (voir Figure 12), une distance raisonnable que nous retiendrons est la distance pour laquelle l'équation d'atténuation donne une accélération inférieure à 0,039g/2,5. Pour chaque séisme simulés, nous résolvons donc l'équation :

$$PGA_{M_W,D,d}(X_{max}) = 0.0156g$$

où  $M_W$ ,  $D$  et  $d$ , respectivement la magnitude des moments, la profondeur et une constante associée au type de séisme, dépendent de l'évènement simulé et  $X_{max}$  la distance maximale d'un site à la source pour que l'impact soit évalué.

Dans la plupart des modèles cités en Partie 3, la même distance maximale est utilisée quelque soit le séisme : 240km en général (Daniell 2009a). Cependant, lors des séismes de Mexico de 1957 et 1985, des dégâts furent observés à 400km de l'épicentre tandis que la portée du séisme de Cauçete de 1972 en Argentine s'éleva à plus de 900km. Notre choix paraît donc plus cohérent avec la cause des dégâts.



## 5 Modélisation du risque

Les séismes tuent rarement directement les personnes mais détruisent les constructions les plus vulnérables qui s’effondrent complètement ou partiellement, blessant mortellement ou non les personnes présentes à l’intérieur ou autour du bâtiment. Bien que l’on retrouve au Japon des structures parmi les plus résistantes face aux séismes du monde, aucune construction n’est immunisée contre les séismes.

Toutefois, la fragilité des constructions et la vulnérabilité des occupants peuvent être modélisées ce qui permet d’obtenir une estimation rationnelle du nombre de victimes. L’objectif de ce module est donc d’estimer, pour un séisme simulé dans le module d’aléa, le nombre de décès. En appliquant par la suite le taux de pénétration de notre portefeuille dans la population générale, ce nombre de victimes peut être transformé en perte portefeuille. Ce module reprend les méthodologies du système PAGER développé par l’agence américaine de prévention des catastrophes (*Federal Emergency Management Agency*, FEMA) et notamment les modèles de mortalité empirique, basé sur la population soumise à des intensités macrosismiques, et analytique, basé sur la vulnérabilité des structures.

### 5.1 Exposition

Le projet GED4GEM (*Global Exposure Database for Global Earthquake Model*) a rendu disponible une base de données, GED (*Global Exposure Database*), sur le stock de bâtiments et la population mondiaux sous forme d’une grille dont chaque cellule, appelée site, fait environ  $1\text{km}^2$ <sup>8</sup>. Pour le Japon, ces données ont entre autres été obtenues en extrapolant les informations régulièrement publiées par le Bureau de Statistiques du Japon, notamment les recensements de la population et des bâtiments résidentiels par type de construction. La méthodologie permettant de distribuer le stock de bâtiments et la population à partir de ces informations est décrite dans Gamba et al. (2012).

TABLE 5 – Informations de la GED pour un site au Japon (latitude=24.43°Nord, longitude=122.97°Est)

Code	Usage	Occupants (jour)	Occupants (nuit)	Occupants (transit)	Nombre de bâtiments	Aire totale (m <sup>2</sup> )	Valeur totale (US\$)
W1	résidentiel	2.9	0.1	4.9	5.0	662.2	1 029 307
W2	résidentiel	3.0	0.1	5.1	5.2	689.8	1 072 195
C2L	résidentiel	0.1	0.0	0.2	0.2	27.6	42 887
W1	non résidentiel	1.7	7.4	3.7			
W2	non résidentiel	1.0	4.2	2.1			
RM2	non résidentiel	0.2	0.7	0.4			
C1	non résidentiel	0.6	2.5	1.2			
C2L	non résidentiel	0.3	1.2	0.6			
C4	non résidentiel	0.3	1.2	0.6			
S1	non résidentiel	0.6	2.5	1.2			
S2	non résidentiel	0.6	2.5	1.2			
S4	non résidentiel	0.6	2.5	1.2			

8. Plus précisément, les positions sont séparées par un pas de 30 secondes d’arc de longitude et de latitude.

Dans la Table 5 sont présentées les différentes informations données par la GED pour un site indiqué comme étant situé dans une zone non urbaine parmi les 6 882 394 situés au Japon. Les bâtiments sont répartis en plusieurs catégories : résidentiel et non-résidentiel (bureaux, etc.), urbain et rural. En outre, le stock de bâtiments est distribué entre plusieurs types de construction (voir Table 6). Ces typologies, formant ensemble une taxonomie, permettent de décrire les éléments, structurels ou non, qui influencent la réaction des bâtiments à un mouvement du sol (matériau, hauteur, technique de construction). Cette taxonomie a originellement été développée pour le système PAGER, censé s’appliquer au stock de bâtiments des États-Unis.

TABLE 6 – Taxonomie des bâtiments et répartition du stock

Code	Description	Part des habitants hébergés (%)
W1	Murs en bois avec revêtement de plâtre / panneau de gypse	25
W2	Structure en bois, lourds éléments (superficie supérieure à 5000 pieds carrés)	22
RM2	Structure en maçonnerie renforcée avec une couche de béton	1
C1	Structure ductile en béton armé	5
C2L	Petits murs de refend en béton	16
C4	Structure rigide en béton armé sans murs de remplissage en maçonnerie	2
S1	Structure en acier	9
S2	Contreventements en acier	5
S4	Structure en acier avec des murs en béton coulé sur place	9

La population est distribuée entre les sites et entre les types de structures pour trois heures de la journée : la nuit (2h00), le jour (14h00) et l’heure à laquelle un maximum d’habitants se déplacent (période de transit, 17h00). Un séisme pouvant survenir à n’importe quel moment de la journée de manière équiprobable, nous transformons ces heures caractéristiques de la journée en plages horaires (voir Table 7). Ainsi, sachant qu’un séisme survient, nous pouvons en déduire la probabilité que la distribution de la population soit celle d’un certain moment de la journée.

Moment	Plage horaire	$\mathbb{P}(Moment Rupture)$
Nuit	20h00 - 8h00	50%
Jour	10h00 - 17h00	30%
Transit	8h00 - 10h00 et 17h00 - 20h00	20%

TABLE 7 – Probabilité de survenance d’un séisme en fonction de l’heure sachant qu’un séisme survient dans la journée

Pour prendre en compte les variations de la distribution de la population en fonction de l’heure de survenance d’un séisme plus précisément, il faut reconnaître que les plages horaires indiqués dans la Table 7 ne sont pas les mêmes pour toute la population. En effet, elles varient fortement en fonction de l’âge, du sexe et du jour de la semaine par exemple. La *Nippon Hoso Kiokai* (NHK, Compagnie de diffusion du Japon), publie régulièrement des statistiques sur le temps que consacrent les Japonais à leurs activités quotidiennes (sommeil, travail, déplacement, etc.). Ces données peuvent être utilisées pour prendre une distribution de la population qui

soit une moyenne pondérée des trois distributions susmentionnées en fonction de l'heure. La Figure 13 représente ce que pourrait être l'évolution d'une telle pondération au cours de la journée.

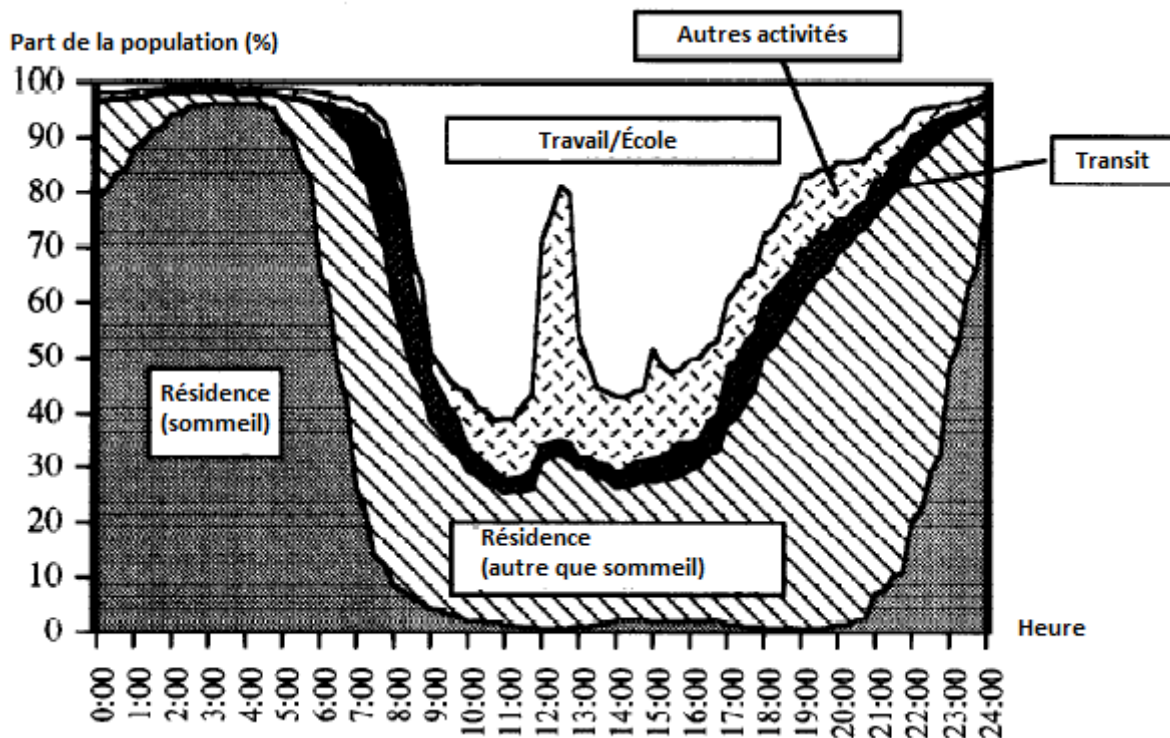


FIGURE 13 – Activités journalières des habitants de Tokyo (Yamazaki et al. 1996)

Dans le modèle analytique de mortalité du système PAGER, la réaction d'autres constructions est prise en compte si elles abritent ou supportent un grand nombre de personnes (écoles, ponts, hôpitaux) ou si un sévère endommagement peut entraîner une nouvelle catastrophe (centrale nucléaire, usine de produits chimiques).

Le séisme intraplaque de Fukushima de 2011 (Holt et al. 2012) endommagea immédiatement la structure d'une centrale nucléaire située à quelques kilomètres, puis, entraîna la formation d'un tsunami, dont la hauteur de la vague s'éleva jusqu'à 38m par endroits, qui déferla sur la côte et inonda le système de refroidissement principal le stoppant. Le coeur de 3 des réacteurs, qui n'étaient alors plus refroidis, entrèrent en fusion, faisant fondre puis exploser les cuves les contenant. Des gaz radioactifs s'échappent et contaminent l'eau des environs et l'atmosphère. Ce désastre est le résultat d'une catastrophe sismique (un tremblement de terre et un tsunami) qui déclencha une catastrophe nucléaire<sup>9</sup>. Le bilan humain est aujourd'hui estimé à 18 457 morts ou disparus, dont 90% sont attribuables au tsunami, auxquels s'ajoutent 34 décès lors de l'évacuation des habitants. Bien que certains employés de la centrale furent exposés à de sévères radiation et hospitalisés, les radiations ne firent officiellement aucune victime. Nous pouvons facilement imaginer que le bilan aurait pu être beaucoup plus lourd si la population à proximité avait été irradiée.

Nous reconnaissons donc que la prise en compte de ce type de scénario est indispensable pour comprendre le risque sismique dans son ensemble mais comme ni le nombre ni la position

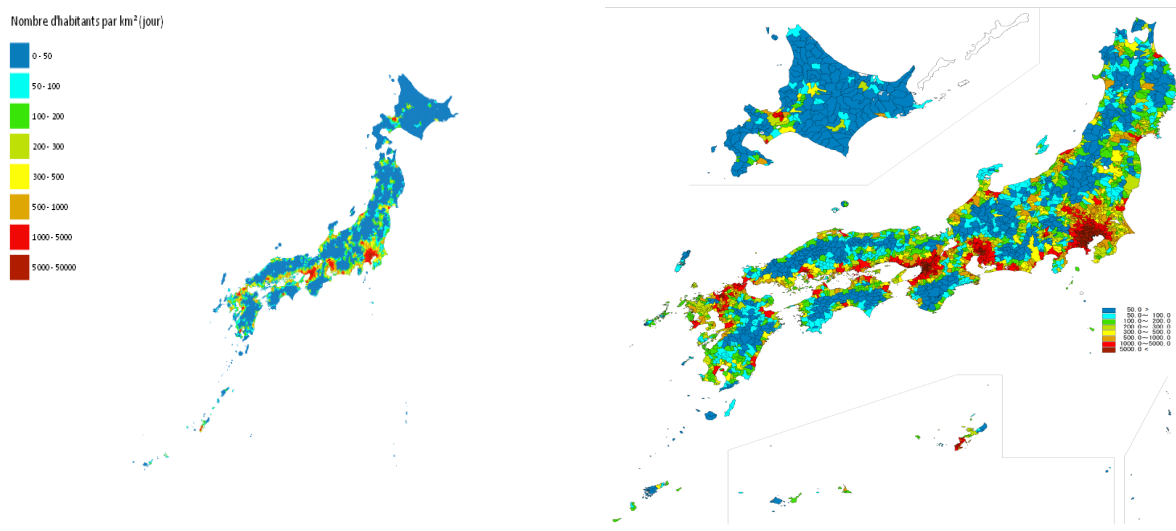
9. Ce type d'évènement est appelé *Genpatsu-shinsai* au Japon.

de ces structures ne sont pas présents dans la GED nous nous limiterons aux bâtiments classiques.

Le bois est le matériau de construction traditionnel au Japon à cause de son abondance dans les forêts du pays. Le plus ancien exemple encore intact est un temple bouddhique construit au VI<sup>ème</sup> siècle (Yamato, s.d.). La taille des bâtiments en bois peut aller de quelques mètres carrés jusqu'à plusieurs milliers de mètres carrés et plusieurs dizaines de mètres de hauteur. Malheureusement, ces bâtiments sont parmi les moins résistants aux séismes (voir Figure 16). En outre, leur structure légère est souvent surmontée d'une toiture en tuiles vernissées très lourde. Ce type de toiture permet aux habitations de résister aux typhons qui frappent régulièrement le Japon (plus fréquemment que les séismes). En revanche, lors d'un séisme de forte intensité, la structure en bois ne peut plus supporter sa toiture qui s'effondre en mille feuilles sur les occupants piégés par ces lourds éléments. Ce type de construction est également problématique lors d'incendies déclenchés à la suite d'un séisme. La construction de nouveaux bâtiments en bois est désormais réglementée (la hauteur du bâtiment est notamment limitée) mais environ la moitié des nouvelles constructions sont tout de même faites de bois.

Dans la méthodologie présentée ici, l'exposition considérée est celle de la population japonaise totale. Nous pouvons imaginer que cette base d'exposition pourrait être modifiée si des informations spécifiques aux assurés du portefeuille comme le lieu de résidence, de travail, étaient disponibles. Dans le cas contraire, nous pouvons appliquer le taux de pénétration de notre portefeuille dans la population totale.

Nous pouvons comparer la répartition de la population donnée par la GED à celle publiée par l'institut de statistiques du Japon en termes de densité.



(a) Densité de population au Japon le jour donnée par la GED (Gamba et al. 2012)

(b) Densité de population officielle au Japon en 2000 (Bureau 2000)

## 5.2 Dégâts causés aux bâtiments

En 1924, à la suite du séisme de Kanto, le Japon a mis en place des normes de résistance aux séismes pour les nouvelles constructions. Ces normes, décrite par exemple dans Ishiyama (2011), ont été mises à jour de nombreuses fois depuis notamment en 1950 et en 1981 et les bâtiments

construits selon ces normes sont respectivement qualifiés de *kyu-taishin* et *shin-taishin*. Lors du séisme de Kobe de 1995, 0,3% des bâtiments *shin-taishin* étaient lourdement endommagés contre 8,4% pour les bâtiments *kyu-taishin*.

Par conséquent, l'ancienneté du stock de bâtiments est un facteur qui peut fortement influencer le nombre de bâtiments détruits et donc le nombre de victimes. L'instauration de normes parasismiques soulève également un arbitrage entre l'intensité à laquelle les bâtiments peuvent résister et le coût de (re-)construction et a finalement un impact limité dans les pays en développement à cause par exemple de la corruption. En 2005 au Japon, le gouvernement japonais a déclaré avoir découvert qu'une série de documents produits par des architectes et censés prouver le respect des normes sismiques pour des constructions de la préfecture de Chiba avait été falsifiées. Le nombre de bâtiments concernés est encore inconnu même si certains ont été détruits selon un article du *Japan Times*. Dans cette partie nous cherchons à répartir le stock de bâtiments entre différents états en fonction de l'intensité du séisme au niveau du site : aucun dommage, faiblement endommagé, modérément endommagé, largement endommagé, complètement endommagé et effondré.

### 5.2.1 Bâtiments endommagés

Pour simuler la réaction des bâtiments, le modèle empirique de PAGER propose d'utiliser des fonctions log-normales, telles que celles en Figure 15, qui décrivent la probabilité pour une structure d'être dans un état d'endommagement supérieur ou égal à un état donné parmi les états aucun dommage, faiblement endommagé, modérément endommagé, largement endommagé et complètement endommagé en fonction de l'accélération au sol (*PGA*). Pour un type de structure et une accélération donnés, la somme de ces probabilités vaut 1 de telle sorte que l'intégralité du stock de bâtiments est répartie entre les différents états d'endommagement. Pour chaque type de structure, le nombre de bâtiments dans chaque état d'endommagement est donc déterminé de manière déterministe à l'aide des probabilités obtenues par les fonctions log-normales. En réalité, les bâtiments d'un même groupe ne réagissent pas de la même manière à la même accélération : ce phénomène est aléatoire. Les paramètres des fonctions log-normales utilisés par PAGER, donnés en Annexe D et disponibles sur la base de données VEM (*Vulnerability Earthquake Methods*) du GEM, correspondent à la réaction médiane des structures.

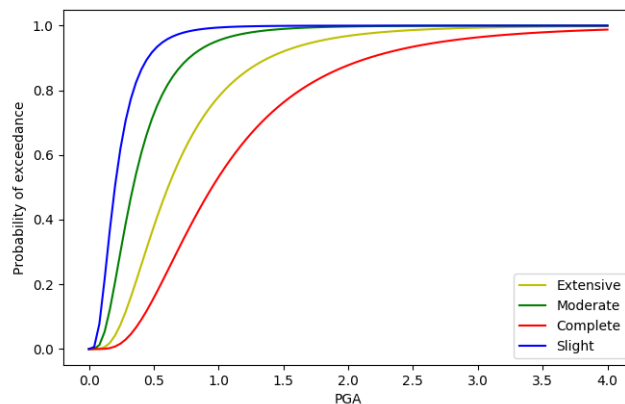


FIGURE 15 – Courbes de fragilité (W1 - normes antisismiques faibles)

En outre, ces courbes de fragilité distinguent les bâtiments en fonction des normes de construction selon lesquelles ils furent construits, ce qui correspond peu ou prou à leur période de construction. Cependant, ils sont adaptés aux normes parasismiques américaines et non japonaises.

Finalement, on obtient pour chaque site  $i$  et chaque type de bâtiment  $b$  :

- $\mathbb{P}_{i,b}(Aucun)$  aucun dommage
- $\mathbb{P}_{i,b}(Faible)$  faibles dommages
- $\mathbb{P}_{i,b}(Modere)$  dommages modérés
- $\mathbb{P}_{i,b}(Large)$  larges dommages
- $\mathbb{P}_{i,b}(Complet)$  complètement endommagé

A la lumière des courbes de fragilité du système PAGER pour des bâtiments construits avant l'existence de normes antisismiques, la probabilité de se trouver dans un état d'endommagement complet tous types de construction confondus pour une accélération au sol de 0,1g est au plus de 1% (voir Figure 16). Nous rappelons que dans la Partie 4.3.4 nous avons choisi d'évaluer les dégâts uniquement pour les sites subissant une accélération du sol de plus de 0,0156g ce qui semble donc très raisonnable.

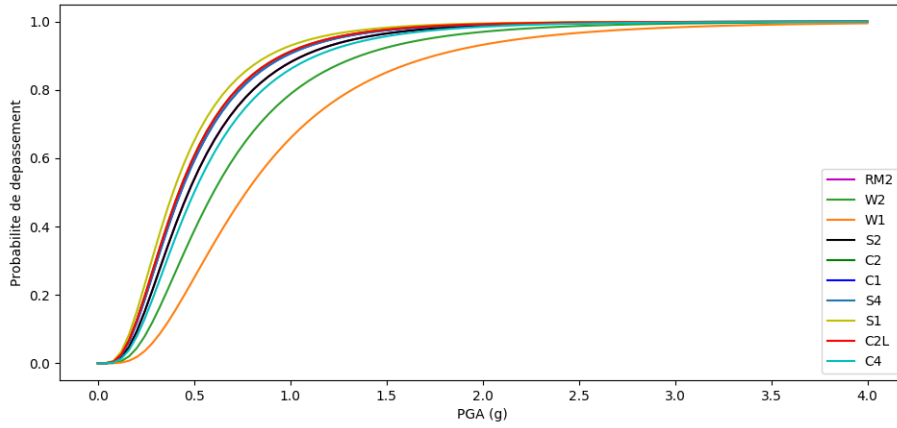


FIGURE 16 – Probabilité d'endommagement complet pour des constructions antérieures aux normes parasismiques

### 5.2.2 Effondrement des bâtiments

Parmi les bâtiments complètement détruits, une certaine proportion s'effondre. Cette répartition est représentée par une probabilité d'effondrement sachant un état d'endommagement complet :

$$\mathbb{P}_{i,b}(Effondrement|Complet)$$

Cette probabilité dépend donc uniquement de la typologie du bâtiment.

TABLE 8 – Probabilité d’effondrement des bâtiments complètement endommagés

Type de bâtiment	Probabilité d’effondrement
W1	0.03
W2	0.03
C2L	0.13
RM2	0.1
C1	0.1
C4	0.13
S1	0.05
S2	0.05
S4	0.05

$$\mathbb{P}_{i,b}(Complet) = \mathbb{P}_{i,b}(CompletSansEffondrement) + \mathbb{P}_{i,b}(Effondrement)$$

$$\text{où } \mathbb{P}_{i,b}(Effondrement) = \mathbb{P}_{i,b}(Complet) * \mathbb{P}_{i,b}(Effondrement|Complet)$$

Le stock de bâtiment sur un site est donc réparti entre 6 états en fonction de l’intensité du séisme :

- Aucun dommage
- Faibles Dommages
- Dommages Modérés
- Grandes Dommages
- Complètement endommagé sans effondrement
- Effondré

Cette méthode d’estimation des dommages causés aux bâtiments est souvent décrite comme fondée sur le spectre de capacité mais d’autres méthodes existent comme celles dites basées sur le déplacement. Nous choisissons d’utiliser les courbes de fragilité de PAGER car la taxonomie des bâtiments correspond avec celle de notre base d’exposition. Cependant, des courbes de fragilité adaptées aux spécifications des constructions Japonaises et correspondant donc à la même taxonomie que celle utilisée lors des recensements des bâtiments ont été calibrées dans Yamaguchi et Yamazaki (2000).

### 5.3 Estimation du nombre de victimes

Les causes de décès lors d’un séisme peuvent être classées en trois catégories :

- Dommages structurels aux bâtiments (effondrement, chute de parties de la structure des bâtiments)
- Autre catastrophe survenue à la suite du séisme (incendie, tsunami, éboulement, inondation, etc.)
- Autres causes (crise cardiaque, accidents, etc.)

Comme le montre la Figure 17, le facteur de mortalité prépondérant lors d’un séisme est l’effondrement des bâtiments qui est responsable de plus de 75% des décès. Cependant, lors de la survenance d’un effet secondaire à la suite d’un séisme (incendie, tsunami, etc.), le nombre de décès qu’il cause est fortement susceptible de dominer le nombre de décès causés par le tremblement de terre à proprement parler.



### 5.3.1 Modèle analytique

Dans ce module, nous tentons d'estimer les décès en excluant ceux dûs à des catastrophes survenues à la suite du séisme qui nécessiterait une modélisation annexe. De plus, nous négligeons les victimes de dommages non structuraux qui sont peu nombreuses et difficiles à prédire.

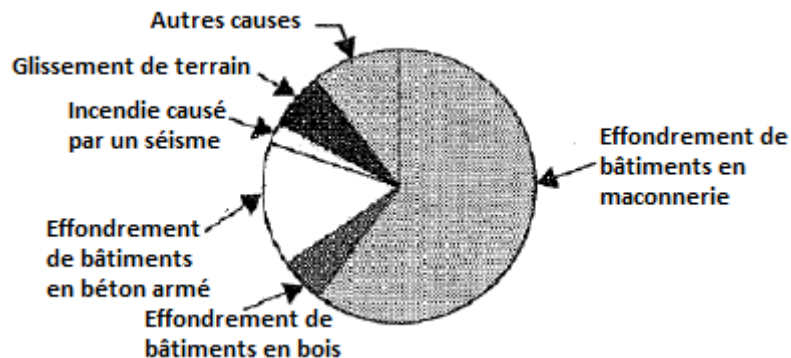


FIGURE 17 – Répartition de 700 000 décès dus à un séisme entre 1950 et 1999 par cause (Coburn et al. 1994)

L'étude Coburn et al. (1994) a permis de montrer, à partir d'une base regroupant 1 100 séismes survenus à travers le monde au cours du XX<sup>e</sup> siècle pour lesquels les recensements des dégâts aux bâtiments et des décès sont suffisamment fiables, que le nombre de victimes était fortement corrélé au nombre de bâtiments détruits, surtout lorsque plus de 5 000 bâtiments sont lourdement endommagés (voir Figure 18).

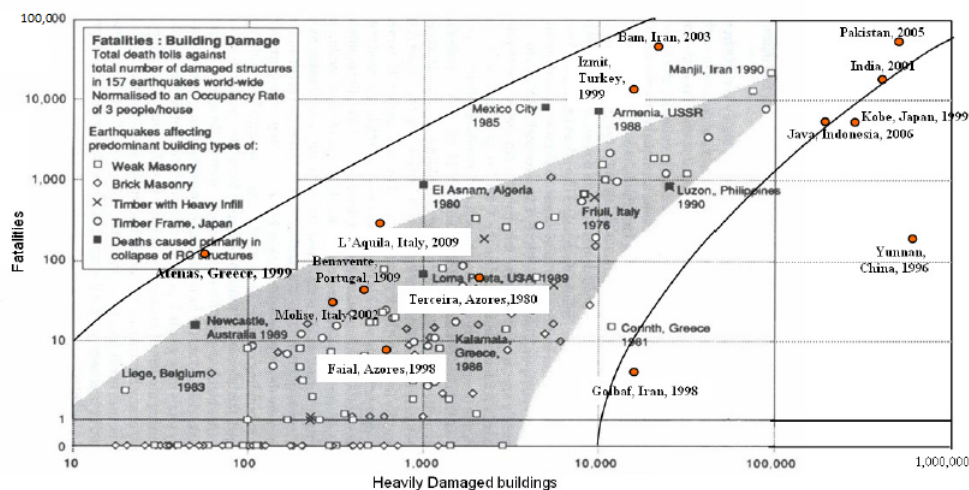


FIGURE 18 – Nombre de décès en fonction du nombre de bâtiments fortement endommagés (Ferreira et Oliveira 2009)

En général, dans un bâtiment effondré, seule une partie des occupants périt. Certains parviendront à s'extirper des décombres par eux-mêmes ou bien les secours dépêchés sur le site parviendront à les extraire des ruines suffisamment rapidement pour les sauver. Nous reprenons les taux de mortalité utilisés dans le modèle analytique système PAGER par type de bâtiment et par état d'endommagement présentés dans la Table 9. Ces taux de décès sont donc adéquats pour une population américaine. L'application de ces mêmes taux à une autre population, en



l'occurrence la population japonaise, pourrait porter à conséquence si le degré de préparation des populations et des secours sont significativement différents.

TABLE 9 – Taux de mortalité par type de bâtiment et par état d'endommagement

Type	Faible	Modéré	Large	Complet Sans Effondrement	Complet Avec Effondrement
W1	0	0	0.00001	0.0001	0.05
W2	0	0	0.00001	0.0001	0.1
C2L	0	0	0.00001	0.0001	0.1
RM2	0	0	0.00001	0.0001	0.1
C1	0	0	0.00001	0.0001	0.1
C4	0	0	0.00001	0.0001	0.1
S1	0	0	0.00001	0.0001	0.1
S2	0	0	0.00001	0.0001	0.1
S4	0	0	0.00001	0.0001	0.1

Finalement, le taux de décès des occupants de bâtiments de type  $b$  sur le site  $i$  s'écrit :

$$\mathbb{P}_{i,b}(Deces) = \sum_{Etat \neq Aucun} \mathbb{P}_{i,b}(Deces|Etat) \times \mathbb{P}_{i,b}(Etat)$$

Pour estimer le nombre décès, on applique ce taux de mortalité au nombre d'occupants du moment de la journée  $t$  (jour, nuit ou période de transit). Par conséquent, le nombre de victimes prédit est le produit de la vulnérabilité du bâtiment, de la vulnérabilité des habitants et du nombre d'occupants.

$$\begin{aligned} \mathbb{E}_{i,b,t}(NbDeces) &= \mathbb{P}_{i,b}(Deces) \times Pop_{i,b,t} \\ \mathbb{E}_{i,t}(NbDeces) &= \sum_b \mathbb{E}_{i,b,t}(NbDeces) \end{aligned}$$

Le système PAGER modélise également les victimes aux abords des bâtiments causées par la chute d'éléments de la structure comme la cheminée. Cependant, ces taux de mortalité pour les victimes extérieures doit être appliqué au nombre de personnes situées à l'extérieur du bâtiment qui n'a pas pu être récupéré.

### 5.3.2 Modèle empirique

La méthodologie discutée précédemment est prétendue raisonnable pour des séismes de forte intensité mais inadaptée pour des séismes d'intensité modérée ou plus faible encore. Dans ces circonstances, les dommages aux bâtiments ne sont plus la cause principale de décès et les causes devraient être modélisées. Le modèle empirique du système PAGER (Jaiswal et al. 2009) permet de prendre en compte les décès dus à des dommages non structurels. En revanche, ce modèle ne prend pas en compte la vulnérabilité du stock de bâtiments mais uniquement la densité de population.

Le taux de mortalité sur le site  $i$  est ici une fonction de l'intensité ressentie  $S_i$ , mesurée sur l'échelle de Mercalli modifiée :

$$\mathbb{P}_i(Deces) = \Phi\left(\frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{S_i}{\theta}\right)\right)$$

Où  $\Phi$  représente la fonction de répartition d'une loi normale centrée réduite. Le nombre de décès est ensuite estimé par :

$$\mathbb{E}_{i,t}(NbDeces) = \mathbb{P}_i(Deces) \times Pop_{i,t}$$

Le modèle a été calibré à partir des observations de 22 séismes mortels et les estimations des paramètres de la loi log-normale sont :

$$\begin{aligned}\beta &= 0.10 \\ \theta &= 11.93\end{aligned}$$

### 5.3.3 Autres facteurs influençant la mortalité

Le séisme de Kobe de 1995 a brisé les canalisations de gaz et d'eau de la ville, alimentant l'incendie et rendant impuissants les pompiers qui durent alors pomper l'eau de la mer. Les secours envoyés par le gouvernement ont mis pratiquement deux jours à arriver. En outre, les personnes habitant à Kobe depuis toujours n'avaient jamais vécu de séismes d'une telle ampleur et ne savaient pas comment réagir. Depuis cette catastrophe, le dispositif de secours qui était la responsabilité de chaque préfecture a été regroupé au niveau national et de nombreux travaux de rénovation ont été entrepris. Des entraînements sont organisés notamment dans les écoles pour préparer les populations à réagir en cas de séisme. La calibration des paramètres d'un modèle de mortalité causée par un séisme doit donc prendre en compte à la fois la spécificité du territoire auquel la méthodologie est appliquée et l'évolution temporelle de la vulnérabilité des populations.

D'autres facteurs influent sur le taux de mortalité observé dans les bâtiments endommagés par un séisme, notamment l'âge et le sexe des occupants (voir Figure 19). Yamazaki et al. (1996) et Miyano et al. (2000) ont analysé les certificats de décès à la suite du séisme de Kobe en 1995. Leur principale découverte est que les femmes et les personnes âgées sont les principales victimes lors des séismes destructeurs. Une modélisation plus fine pourrait donc prendre en compte la distribution de la population par genre et par tranche d'âge pour appliquer des taux de mortalité spécifiques à chaque groupe.

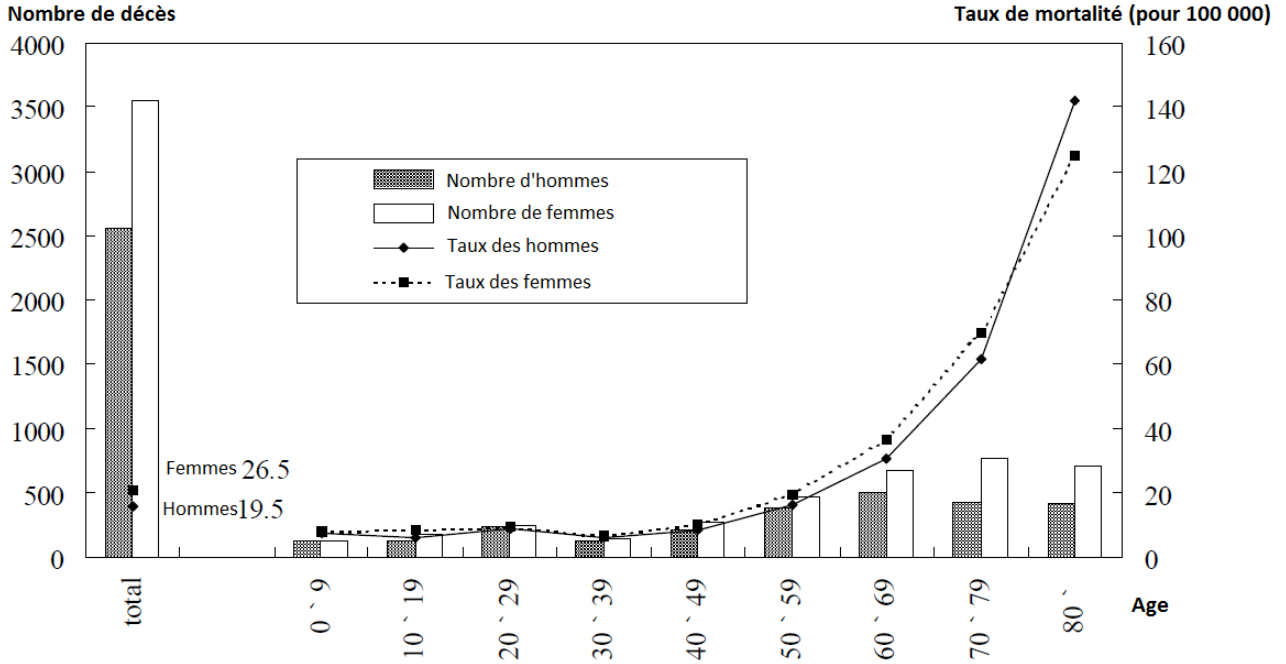


FIGURE 19 – Mortalité dans la ville de Kobe lors du séisme de 1995 (Miyano et al. 2000)

## 5.4 Estimation des pertes du portefeuille

L'exposition d'*AXA Life Japan* au risque de mortalité est disponible à l'échelle de la préfecture. La méthodologie décrite plus haut permettant de calculer un taux de mortalité par site, représentant des zones de  $1\text{km}^2$ , ces résultats sont agrégés par préfecture  $j$ , ajustés à la population totale officielle par préfecture (issue du recensement publié régulièrement par le *Statistics Bureau of Japan*, Bureau 2000), avant d'appliquer le taux de pénétration d'*AXA Life Japan* par préfecture.

$$\mathbb{E}_{j,t}(NbDeces) = \left( \sum_{i, Site_i \in Pref_j} \mathbb{E}_{i,t}(NbDeces) \right) \times PopAjust_{j,2017}$$

Les facteurs d'ajustement de la population par préfecture (voir Annexe E) sont suffisamment proches de 1 pour ne pas trop modifier les résultats obtenus avec la population de la *Global Exposure Database* tout en permettant d'appliquer le taux de pénétration aux estimations les plus récentes de la population totale par préfecture.

$$\mathbb{E}_{j,t}(NbDecesPortfolio) = \mathbb{E}_{j,t}(NbDeces) \times TxPenetration_j$$

Les taux de pénétration sont quant à eux gardés à la discrétion de l'organisme d'accueil et ne sont donc pas présentés dans ce rapport. Si l'exposition du portefeuille était disponible à une granularité plus fine, à l'échelle de la municipalité par exemple, le taux de pénétration devrait être appliqué à cette granularité. Toutefois, nous reconnaissons que pour des problématiques de confidentialité, il n'est pas toujours possible d'exploiter une telle décomposition de l'exposition. Si enfin le lieu de résidence et de travail des assurés étaient connus ainsi que le type de ces bâtiments, une base d'exposition comportant uniquement ces informations pourrait être substituée à la base relative à la population totale Japonaise utilisée ici.

## 6 Cohérence et calibration du modèle

Le modèle développé a été construit utilise des données de différentes sources, fruit de calibrations non reproduites ici mais réputées valides : recherches en sismologie motivées par l'ERC, courbes de vulnérabilité et taux de mortalité provenant du modèle Hazus, stocks de bâtiments et répartition de la population issus de la GED. Pour vérifier l'adéquation de nos hypothèses avec la réalité, plusieurs résultats issus de notre modèle peuvent être comparés à ceux de sources externes. Cela permet dans un premier temps de vérifier la cohérence de notre modèle.

Comme dans toute modélisation, il existe une part d'incertitude dans le nombre de décès prédits. L'objectif sera donc de caractériser cet aléa qui subsiste à partir des erreurs de notre modèle lors de la re-simulation d'évènements passés.

### 6.1 Fréquence des séismes

Pour chaque source de séismes, la spécification du processus de survenance d'une rupture permet de calculer une probabilité d'occurrence d'une rupture à horizon un an. Parmi les 37 224 sources de séismes susceptibles de générer un séisme durant les 30 prochaines années, 37 212 sources ont une probabilité de rupture à horizon 1 an supérieure à  $10^{-20}$ . Nous sélectionnerons uniquement ces sources pour constituer notre catalogue d'évènement. La Table 10 montre que la plupart de nos sources génèrent rarement un séisme : en moyenne de un tous les 100 ans à un tous les 10 000 ans. En considérant que ces processus sont mutuellement indépendants, le nombre annuel moyen de séismes peut donc être grossièrement estimé par la somme des probabilités de survenance de chaque source, égale à 77.02.

TABLE 10 – Probabilité de rupture des 37 224 sources à horizon 1 an

Nombre de sources	$\mathbb{P}(\tau_{rupture} \in [t_0, t_0 + 1])$
1 575	$10^{-1} - 10^{-2}$
15 622	$10^{-2} - 10^{-3}$
19 739	$10^{-3} - 10^{-4}$
185	$10^{-4} - 10^{-5}$
13	$10^{-5} - 10^{-6}$
9	$10^{-6} - 10^{-7}$
5	$10^{-7} - 10^{-8}$
5	$10^{-8} - 10^{-9}$
5	$10^{-9} - 10^{-10}$
54	$\leq 10^{-10}$

Nous souhaitons vérifier que cette valeur est cohérente avec l'activité sismique du Japon. La magnitude des moments minimum que puisse générer nos 37 224 sources est de 5,1. De nombreux évènements simulés n'ont donc pas la propension de faire des victimes ce qui disqualifie les catalogues d'évènements catastrophiques mentionnés en Partie 2 (NGDC, EM-DAT, Utsu) des bases de référence pour la fréquence de l'activité sismique car ils se concentrent sur des évènements ayant eu un impact significatif sur les populations.

L'agence gouvernementale d'études géologiques américaine USGS fournit des informations, publiées sur son site officiel, à propos de tous les séismes de magnitude des moments supérieure à 2,5. A partir de ces données, nous avons constitué un catalogue d'évènements survenus entre

1980 et 2016 compris, soit 37 années d'observation, de magnitude des moments supérieure à 5,1 et dont l'hypocentre a une latitude comprise entre 20° et 26° Nord et une longitude comprise entre 122° et 154° Est. Ce catalogue est composé de 4 700 séismes soit en moyenne  $4\,700 / 37 = 127,03$  séismes par an. Notre modèle tendrait donc à sous-estimer le taux de survenance annuel des séismes. Cependant, on peut constater sur la Figure 20 que de nombreux hypocentres se situent à plusieurs centaines de kilomètres du territoire japonais et ne peuvent pas être attribués à une source sismique caractérisées par le HERP. Nous supposons donc, faute d'expertise sismologique plus avancée, que les lois de survenance des ruptures ont été correctement paramétrées.

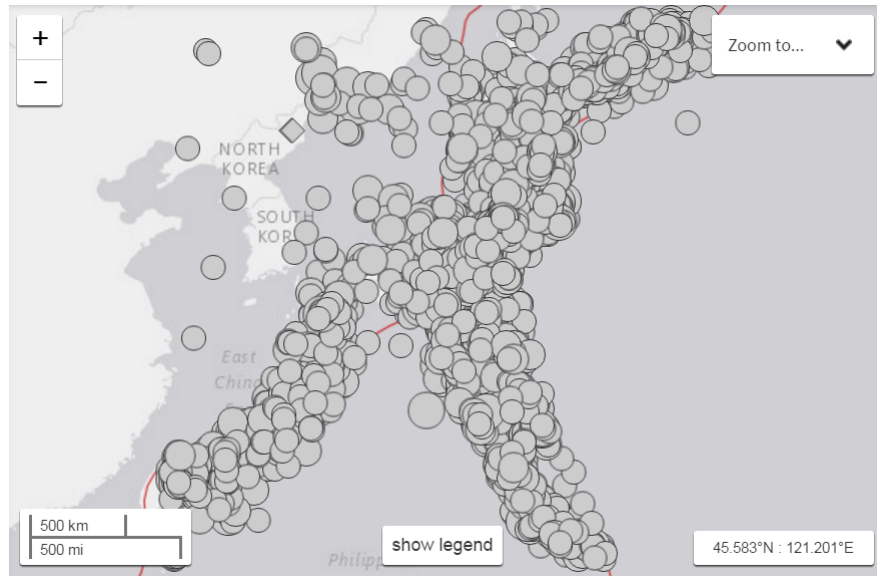


FIGURE 20 – Hypocentre des séismes de magnitude des moments supérieure à 5,1 (1980 - 2016) (Source : USGS)

## 6.2 Simulation d'évènements passés

Pour un séisme donné, c'est-à-dire la combinaison d'une surface de rupture, d'une magnitude et d'un type de séisme, le nombre de décès prédit par notre modèle est obtenu à partir de nos modules d'aléa et de risque qui comportent chacun une part d'incertitude que nous souhaitons estimer. Pour cela nous nous appuyons sur des séismes passés. En effet, leur simulation nous permet de comparer les valeurs prédites aux valeurs observées.

Dans un premier temps, nous constituons un catalogue de séismes historiques présentés dans la Table 11 et sur la Figure 21. Ces séismes sont suffisamment récents pour que des enquêtes fiables sur leurs conséquences aient été menées. De plus, ils semblent assez bien répartis sur l'ensemble du Japon. Enfin, les séismes ne doivent pas avoir eu d'effets secondaires comme un tsunami ou un incendie car les victimes sont rarement répertoriées par cause dans ce cas.

TABLE 11 – Catalogue de séismes historiques au Japon

Nom	Heure	Magnitude	Victimes
Akinada 2001	jour	6.8	2
Chuetsu 2004	transit	6.6	68
Chuetsu 2007	jour	6.6	15
Fukuoka 2005	jour	6.6	1
Hamadori 2011	transit	6.7	4
Hokkaido 2003	nuit	8.3	1
Iwate 2008	transit	6.9	23
Kobe 1995	nuit	6.9	5 062
Kouzu 2000	jour	6.1	1
Kumamoto 2016	nuit	7	41
Kushiro 1993	nuit	7.6	2
Middle Nagano 2011	transit	5	1
Miyagi 2011	nuit	7.1	4
Nagano 2011	nuit	6.3	3
Noto 2007	transit	6.7	1
Kanto 1923	jour	7.9	11 086

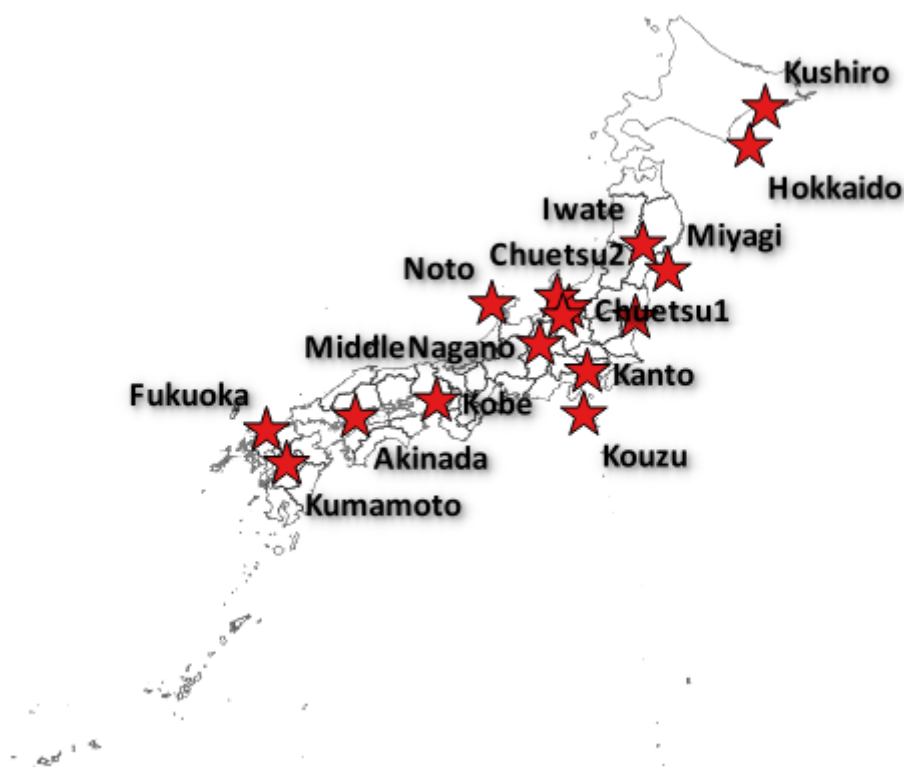


FIGURE 21 – Hypocentre des séismes historiques de notre catalogue

Cependant, les résultats de ces enquêtes comportent toujours une part d'incertitude : en fonction de la source des données, par exemple parmi les catalogues NGDC, EM-DAT et Utsu étudiés en Partie 2, les valeurs reportées (magnitude des moments, nombre de victimes, etc.) peuvent varier fortement comme le montre la Figure 22 pour le nombre de décès. Pour pal-

lier ce problème, des études approfondies sur chaque évènement doit être menée comme pour la réalisation du catalogue CATDAT (Daniell et al. 2011) qui croise plus de 17 000 sources d'informations sur 12 200 séismes destructeurs.

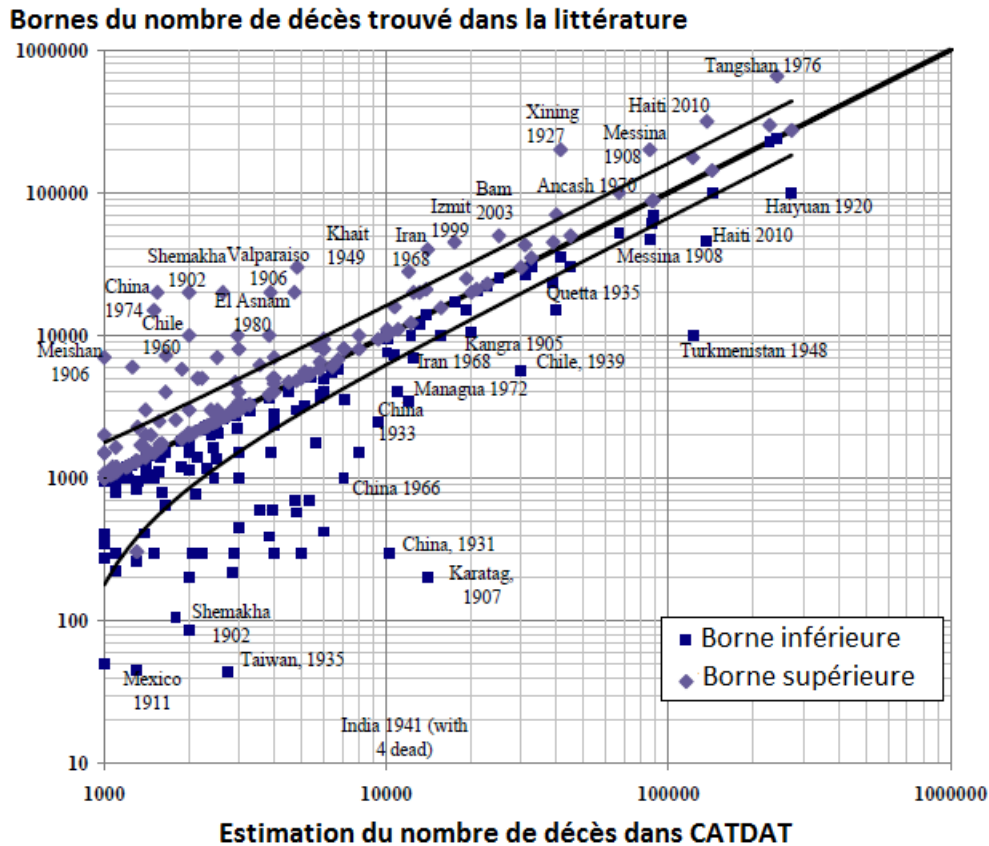


FIGURE 22 – Variabilité du nombre de victimes reporté pour un même séisme

### 6.2.1 Cartes d'isoséistes

A la suite de séismes importants, l'USGS publie depuis 1960 ses estimations de l'intensité du séisme en tout point du territoire (carte d'isoséiste) touché en fonction de la position de l'hypocentre ou de la géométrie de la faille et de la magnitude des moments. Nous comparons donc les résultats de notre module d'aléa à ceux du module équivalent *ShakeMap* de l'USGS.

Le séisme de Kobe de 1995, de magnitude 6,9 sur l'échelle des moments, rompit la faille Rokko-Awajishima. Les prédictions de notre module d'aléa et de l'USGS, mesurées sur l'échelle de Mercalli (voir Partie 4.3.4) sont présentées sur la Figure 23.

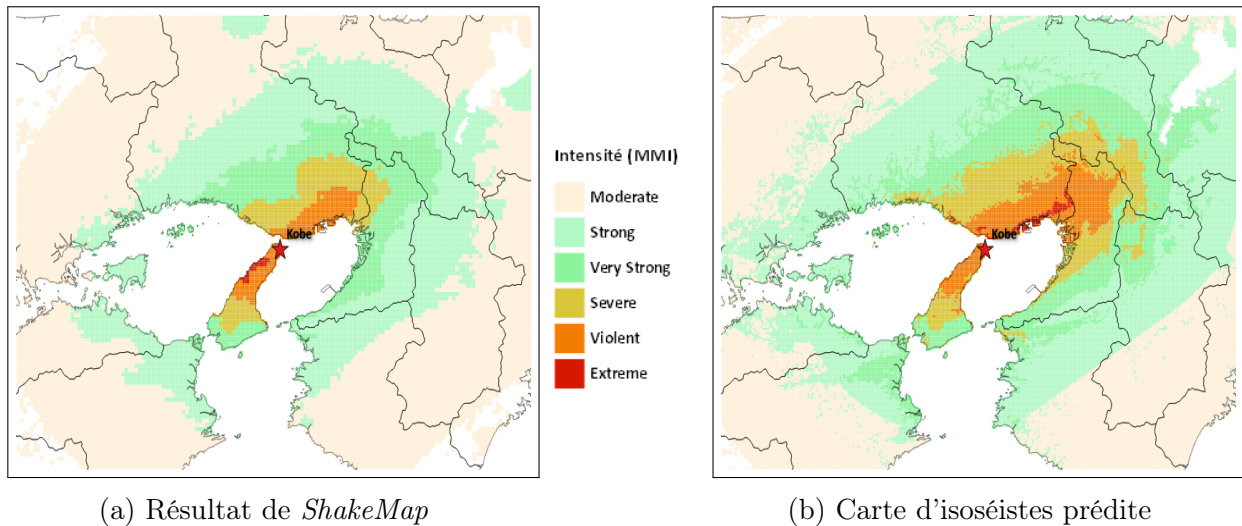


FIGURE 23 – Comparaison des cartes d'isoseistes relatives au séisme de Kobe de 1995 produite par le module *ShakeMap* de l'USGS et par notre module d'aléa sur l'échelle de Mercalli

Sur la Figure 24, nous observons la différence entre les accélérations déduites de l'équation d'atténuation et des effets de site et les accélérations publiées par l'USGS et récupérées depuis son site officiel ( $PGA_{\text{prédit}} - PGA_{\text{USGS}}$ ). Ces différences représentent un terme d'erreur dans la prédiction de l'intensité du séisme. Leur moyenne est de  $0,05g$ <sup>10</sup> ce qui signifie que notre modèle sur-estime l'intensité du séisme. Les différences sont plus grandes en valeur absolue pour les sites les plus proches de la surface de rupture.

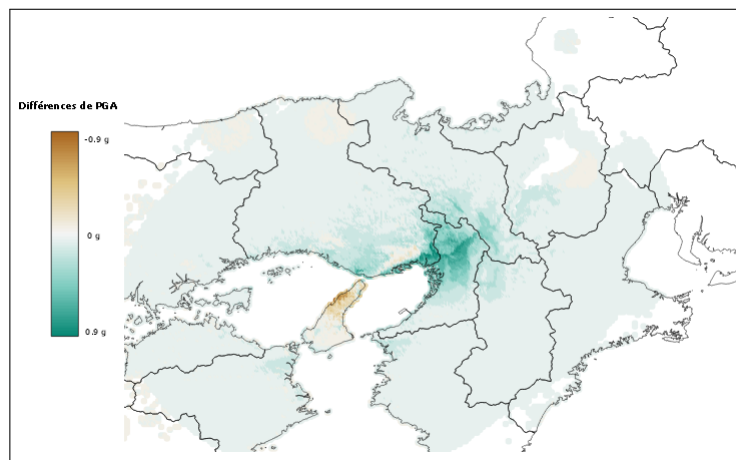


FIGURE 24 – Différence entre les accélérations prédites par l'équation d'atténuation et celles publiées par l'USGS

Nous observons le même phénomène pour l'ensemble des séismes de notre catalogue ce qui signifie d'une part que l'équation d'atténuation utilisée par le module *ShakeMap* est différente de la nôtre et d'autre part que ces équations peinent à prédire correctement les intensités ressenties à proximité des surfaces de ruptures. La Table 12 présente les écarts moyens pour l'ensemble de notre catalogue. Ces erreurs du module d'aléa, présentées dans seront répercutées lors de l'estimation des dégâts causés aux bâtiments et du nombre de victimes.

10. Accélération de la pesanteur ( $= 9.80665m/s^2$ )



TABLE 12 – Ecart de prédiction de l'accélération au sol ( $PGA_{\text{predict}} - PGA_{USGS}$ )

Lieu	Moyenne	Ecart-type
Akinada 2001	-0.016	0.071
Chuetsu 2004	-0.007	0.091
Chuetsu 2007	-0.055	0.077
Fukuoka 2005	-0.019	0.041
Hamadori 2011	-0.022	0.07
Hokkaido 2003	-0.011	0.082
Iwate 2008	0.08	0.171
Kanto 1923	0.081	0.147
Kobe 1995	0.049	0.089
Kouzu 2000	0.077	0.127
Kumamoto 2016	0.046	0.088
Kushiro 1993	0.051	0.211
Middle Nagano 2011	0.013	0.037
Miyagi 2011	-0.066	0.137
Nagano 2011	0.184	0.162
Noto 2007	-0.068	0.099
Moyenne	0.020	0.106

En moyenne, notre module d'aléa semble surestimer l'accélération du sol causée par les séismes. La conséquence pourrait alors être de surestimer les dégâts causés aux bâtiments et donc le nombre de victimes.

### 6.2.2 Nombre de victimes

L'estimation du nombre de victimes d'un séisme est ardue comme le montre les écarts entre les prédictions de modèles complexes présentés en Partie 3.2. Nous pouvons également illustrer cette difficulté par la manière dont le système PAGER présente ses prédictions de nombre de décès. Sur la Figure 25, on peut voir des probabilités associées à chaque ordre de grandeur de nombre de décès ce qui témoigne de la grande imprécision d'une prédiction de nombre exact de décès. En outre, bien que le système soit réputé être un des plus performant pour l'estimation des pertes humaines suite à un séisme, ses prédictions pour le séisme de Kumamoto indique que le nombre de décès est supérieur à 100 avec 90% de chances tandis que ce dernier n'a fait que 41 victimes.

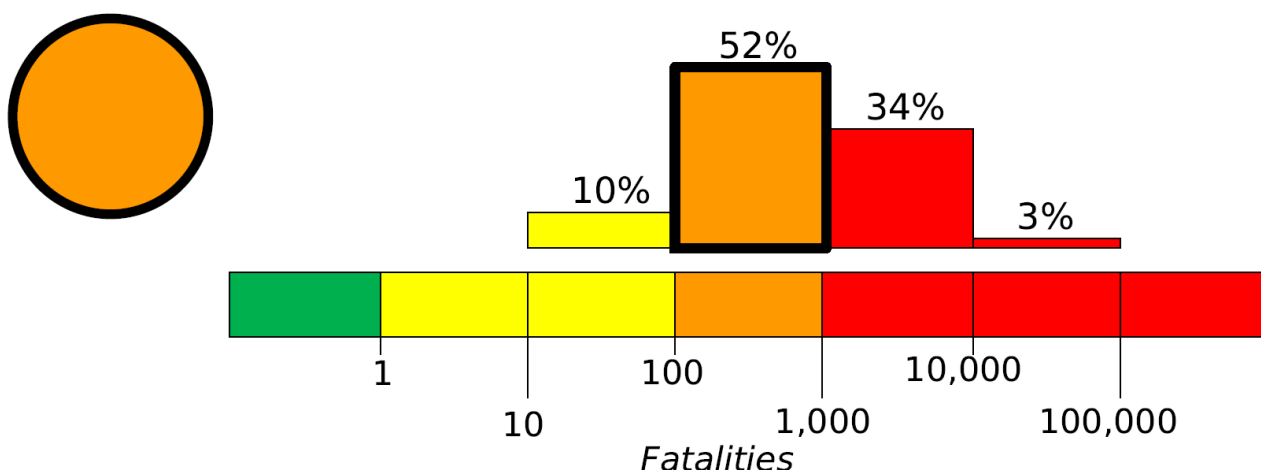


FIGURE 25 – Alerte orange publiée par l’USGS à la suite du séisme de Kumamoto (2016)

Dans un premier temps, à l’aides des cartes d’isoséistes publiées par l’USGS à la suite de chacun des séismes de notre catalogue (Table 11), nous appliquons le module de risque pour en déduire le nombre de victimes. Les résultats sont présentés dans la Table 13 en fonction du niveau des normes sismiques retenues pour le stock de bâtiments (élevées, modérées, etc.).

TABLE 13 – Nombre de victimes observé et prédit par le module de risque à partir des cartes d’isoséistes de l’USGS en fonction du niveau de résistance supposé

Nom	Décès	Élevé	Modéré	Faible	Antérieur
Akinada 2001	2	28	216	861	1 400
Chuetsu 2004	68	121	396	837	1 111
Chuetsu 2007	15	13	87	314	501
Fukuoka 2005	1	15	172	936	1 699
Hamadori 2011	4	7	61	263	454
Hokkaido 2003	1	14	115	451	731
Iwate 2008	23	40	161	464	722
Kobe 1995	5 062	1 479	5 702	13 265	17 981
Kouzu 2000	1	0	0	0	0
Kumamoto 2016	41	162	755	1 922	2 651
Kushiro 1993	2	30	169	512	761
Middle Nagano 2011	1	0	0	0	0
Miyagi 2011	4	347	1 090	2 228	2 895
Nagano 2011	3	0	1	9	19
Noto 2007	1	14	62	171	263
Kanto 1923	11 086	147	1 105	4 091	6 321
Écart moyen (Prédit - Observé)		-869	-389	626	1 325
Écart type des différences		2 745	2 494	2 756	3 398

Nous remarquons que le module de risque a tendance à surestimer l’impact des séismes hormis pour le séisme de Kobe, le plus ancien de notre catalogue. La vulnérabilité du stock de bâtiments a pu s’améliorer depuis 1995 grâce aux leçons apprises du passé. De plus, le Japon est réputé être le pays le mieux préparé aux séismes tandis que notre module de risque est conçu pour des bâtiments construits selon les normes parasismiques américaines, probablement

moins exigeantes.

Nous répétons l'exercice à partir des cartes d'isoséistes générées par notre module d'aléa, ce qui conduit aux résultats présentés dans la Table 14.

TABLE 14 – Nombre de victimes observé et prédit par les modules d'aléa et de risque en fonction du niveau de résistance supposé

Nom	Décès	Élevé	Modéré	Faible	Antérieur
Akinada 2001	2	171	971	3 010	4 438
Chuetsu 2004	68	111	440	1 047	1 431
Chuetsu 2007	15	3	36	196	366
Fukuoka 2005	1	26	232	1 031	1 745
Hamadori 2011	4	15	120	500	847
Hokkaido 2003	1	14	109	435	719
Iwate 2008	23	150	574	1 303	1 764
Kobe 1995	5 062	6 589	20 107	38 024	46 934
Kouzu 2000	1	0	0	1	1
Kumamoto 2016	41	496	1 715	3 672	4 853
Kushiro 1993	2	835	1 389	2 072	2 481
Middle Nagano 2011	1	21	96	245	338
Miyagi 2011	4	183	930	2 593	3 707
Nagano 2011	3	35	167	476	702
Noto 2007	1	0	4	23	46
Kanto 1923	11 086	6 093	17 285	30 787	36 705
Écart moyen (Prédit - Observé)		-98	1 741	4 319	5 673
Écart type des différences		1 325	3 736	8 710	11 089

La combinaison de nos modules d'aléa et de risque cumule les erreurs de chaque module. Toutefois, les résultats sont satisfaisant car le nombre de victimes prédits est le plus souvent du même ordre de grandeur que celui inscrit dans le catalogue historique. Les taux de mortalité en fonction de l'état d'endommagement des bâtiments de la Table 9 ainsi que les paramètres des courbes de fragilité devraient être ajustées pour mieux représenter la vulnérabilité de la population Japonaise.

Nous choisissons les normes élevées

## 6.3 Etude des résidus

Pour étudier les erreurs de prédictions de notre modèles, nous nous intéressons non plus au nombre de décès  $NbDeces$  mais plutôt à  $\log_{10}(NbDeces)$ . Les résidus s'expriment alors :

$$\log_{10}(NbDeces_{prédit}) - \log_{10}(NbDeces_{observé})$$

### 6.3.1 Etude du biais

Test de Student :

$$H_0 : \mu = 0$$

$$H_1 : \mu \neq 0$$

Stat de test : 2.6778 p-value : 0.01721 Nous pouvons rejeter l'hypothèse nulle au seuil de 5% donc nos prédictions sont significativement biaisées.

TABLE 15 – Moyenne des résidus

$q^{2.5\%}$	Moyenne	$q^{97.5\%}$
0.1426334	0.6991251	1.2556167

### 6.3.2 Normalité des résidus

$$\log_{10}(NbDeces_{observe}) = \log_{10}(NbDeces_{predit}) + \epsilon$$

Test de Kolmogorov-Smirnov

$$H_0 : \epsilon \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$$

$$H_1 : \epsilon \not\sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$$

Stat de test : 0.13571 p-value : 0.8922 On ne rejette pas l'hypothèse nulle.

Test de Shapiro-Wilk

$$H_0 : \epsilon \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$$

$$H_1 : \epsilon \not\sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$$

Stat de test : 0.98371 p-value : 0.9862 On ne rejette pas l'hypothèse nulle.  $\mu = 0.6991251$   
 $\sigma = 1.044344$

## 7 Estimation de la distribution des pertes

### 7.1 Générateur de scénario

A chaque source de séisme est associée une fréquence annuelle. Les sources étant indépendantes entre elles, pour générer un scénario annuel, nous simulons un vecteur de lois uniformes de taille le nombre total de source. Nous considérons qu'une source génère un séisme seulement lorsque le tirage associé est inférieur à sa fréquence. Dans ce cas, nous simulons la

### 7.2 Distribution des pertes humaines

### 7.3 Cadre assurantiel

Deux ans après le tremblement de terre de Nigata (M 7,5) en 1964, la Diète du Japon vota l'établissement du premier système d'assurance contre les séismes (*Law concerning Earthquake Insurance*) qui fut révisé huit fois depuis (pour la dernière fois en 2014). Ce système ne concerne que les bâtiments résidentiels et les biens personnels qu'ils peuvent contenir (hors pierres précieuses, antiquités, monnaie fiduciaire, titres etc.). Il est garanti par l'État Japonais grâce à une structure de réassurance nationale détenue par la *Japan Earthquake Reinsurance Co. Ltd.*. Une garantie contre les séismes ne peut pas être contractée seule mais seulement en complément d'une police couvrant l'incendie<sup>11</sup>. En outre, elle ne peut pas être souscrite si un état d'alerte au séisme est proclamé dans la zone où se trouve le bien et la durée de la garantie peut varier de 1 an à 5 ans. L'assuré peut choisir, pour sa garantie tremblement de terre, une somme assurée comprise entre 30% et 50% de la somme assurée spécifiée pour son assurance incendie et dans la limite de 50 millions de Yen pour un bâtiments et 10 millions de Yen pour des biens personnels.

Les primes pour cette garantie varient en fonction de la zone dans laquelle se trouve le bâtiment et du type de construction pour inciter la population à investir dans des bâtiments plus résistants aux séismes.

### 7.4 Influence de la répartition du portefeuille

11. Les polices couvrant l'incendie sans option séisme ne couvrent donc pas les incendies causés par un tremblement de terre.

## Bibliographie

- Bal, IE, H Crowley et R Pinho. 2008. « Displacement-based earthquake loss assessment for an earthquake scenario in Istanbul ». *Journal of Earthquake Engineering* 12 (S2) : 12–22.
- Bureau, Statistics. 2000. « Population census of Japan ». *Ministry of Public Management, Home Affairs, Posts and Telecommunications, Tokyo*.
- Calvi, G Michele, Rui Pinho, Guido Magenes, Julian J Bommer, L Fernando Restrepo-Vélez et Helen Crowley. 2006. « Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years ». *ISET journal of Earthquake Technology* 43 (3) : 75–104.
- Cardona, Omar Dario, Mario Gustavo Ordaz Schroder, Eduardo Reinoso, Luis Yamin et Horia Alejandro Barbat Barbat. 2010. « Comprehensive approach for probabilistic risk assessment (CAPRA) : international initiative for disaster risk management effectiveness ». In *14th European Conference on Earthquake Engineering*, 1–10.
- Coburn, Andrew, et al. 1994. « Death tolls in earthquakes ». In *Workshop : Medicine in the International Decade for Natural Disaster Reduction (IDNDR) : Research, Preparedness and Response for Sudden Impact Disasters in the 1990s, London, Great Britain*, 21–26.
- Crowley, H, D Monelli, M Pagani, V Silva et G Weatherill. 2011. « OpenQuake Book ». *The GEM Foundation, Pavia, Italy*.
- Crowley, Helen, et Julian J Bommer. 2006. « Modelling seismic hazard in earthquake loss models with spatially distributed exposure ». *Bulletin of Earthquake Engineering* 4 (3) : 249–273.
- Crowley, Helen, Rui Pinho et Julian J Bommer. 2004. « A probabilistic displacement-based vulnerability assessment procedure for earthquake loss estimation ». *Bulletin of Earthquake Engineering* 2 (2) : 173–219.
- Daniell, James E, B Khazai, F Wenzel et A Vervaeck. 2011. « The CATDAT damaging earthquakes database ». *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11 (8) : 2235.
- Daniell, JE. 2009a. « Comparison and Production of Open Source Earthquake Loss Assessment Packages, MEEES Thesis ». *ROSE School, Pavia, Italy*.
- . 2009b. « Open Source Procedure for Assessment of Loss Using Global Earthquake Modelling (OPAL Project) ». *CEDIM Earthquake Loss Estimation Series, Research Report No. 09 1*.
- Demircioğlu, MB, et al. 2010. « Earthquake loss estimation routine ELER v3. 0 technical manual ». *Bogazici Univ., Dept. of Earthquake Engineering, Istanbul, Turkey*.
- Ferreira, MA, et CS Oliveira. 2009. « Discussion on human losses from earthquake models ». In *International Workshop on Disaster Causalities, Cambridge, MA*.
- Fujiwara, H, S Kawai, S Aoi, N Morikawa, S Senna, N Kudo, M Ooi, KX Hao, K Wakamatsu, Y Ishikawa et al. 2009. « Technical reports on national seismic hazard maps for Japan ». *Technical Note of the National Res. Inst. for Earth Science and Disaster Prevention (NIED)* 336 : 528.

- Fujiwara, Hiroyuki, Shinichi Kawai, Shin Aoi, Toru Ishii, Toshihiko Okumura, Yuzuru Hayakawa, Nobuyuki Morikawa, Shigeki Senna, Kyoko Kobayashi et Ken Xian-Sheng Hao. 2006. « Japan seismic hazard information station, J-SHIS ». In *Proceedings of the 8th US National Conference on Earthquake Engineering, paper*. 554.
- Gamba, P, D Cavalca, K Jaiswal, C Huyck et H Crowley. 2012. « The GED4GEM project : development of a global exposure database for the global earthquake model initiative ». In *15th world conference on earthquake engineering, Lisbon, Portugal*.
- GIROJ, General Insurance Rating Organization of Japan. 2014. *Earthquake Insurance in Japan*. General Insurance Rating Organization of Japan (GIROJ).
- Guha-Sapir, Debarati, Regina Below et Philippe Hoyois. 2015. « EM-DAT : International disaster database ». *Catholic University of Louvain : Brussels, Belgium*.
- Holt, Mark, Richard J Campbell et Mary Beth Nikitin. 2012. *Fukushima nuclear disaster*. Congressional Research Service.
- Hoshiba, Mitsuyuki, Osamu Kamigaichi, Makoto Saito, Shin'ya Tsukada et Nobuo Hamada. 2008. « Earthquake early warning starts nationwide in Japan ». *EOS, Transactions American geophysical union* 89 (8) : 73–74.
- Imoto, Masajiro, et Hiroyuki Fujiwara. 2012. « Long term probability of a Magnitude 8 Kanto earthquake along the Sagami Trough, central Japan ». *Earth, Planets and Space* 64 (7) : e17–e20.
- Ishiyama, Yuji. 2011. « Introduction to Earthquake Engineering and Seismic Codes in the World ». *Hokkaido University, Hokkaido, Japan*.
- Jaiswal, Kishor, David J Wald et Mike Hearne. 2009. *Estimating casualties for large earthquakes worldwide using an empirical approach*. US Geological Survey.
- Jennings, Steve. 2011. « Time's Bitter Flood : Trends in the number of reported natural disasters ». *Oxfam Policy and Practice : Climate Change and Resilience* 7 (1) : 115–147.
- Kamigaichi, Osamu. 2004. « JMA earthquake early warning ». *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering* 4 (3) : 134–137.
- Kijko, A, et MA Sellevoll. 1989. « Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files. Part I. Utilization of extreme and complete catalogs with different threshold magnitudes ». *Bulletin of the Seismological Society of America* 79 (3) : 645–654.
- Kircher, Charles A, Robert V Whitman et William T Holmes. 2006. « HAZUS earthquake loss estimation methods ». *Natural Hazards Review* 7 (2) : 45–59.
- Matthews, Mark V, William L Ellsworth et Paul A Reasenber. 2002. « A Brownian model for recurrent earthquakes ». *Bulletin of the Seismological Society of America* 92 (6) : 2233–2250.
- Midorikawa, S. 1994. « Site effects on strong-motion records observed during the 1987 Chiba-ken-toho-oki, Japan earthquake ». In *Proc. Ninth Japan Earthq. Eng. Symposium, 1994*, 3 : 85–90.
- Midorikawa, S, et Y Ohtake. 2002. « Attenuation relationships of peak ground acceleration and velocity considering attenuation characteristics for shallow and deeper earthquakes ». In *Proc. 11th Japan Earthquake Eng. Symposium*, 609–614.

- Midorikawa, Saburoh, et Yu Ohtake. 2004. « Variance of peak ground acceleration and velocity in attenuation relationships ». In *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Miyano, Michio, Yuko Sumiyoshi et Rie Nobuara. 2000. « Study of casualties due to earthquake disasters and other accidents in Japan ». In *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand*.
- Munich, RE. 2015. « NatCatSERVICE Loss Events Worldwide 1980–2014 ». *Munich Reinsurance, Munich, Germany*.
- National Geophysical Data Center, NOAA. 2017. « National Geophysical Data Center / World Data Service (NGDC/WDS) : Significant Earthquake Database ».
- PAGER, USGS. 2012. « USGS Pager ». URL : <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/pager>.
- Paz, Mario. 2012. *International handbook of earthquake engineering : codes, programs, and examples*. Springer Science & Business Media.
- QGIS Development Team. 2009. *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation. <http://qgis.osgeo.org>.
- Riera, Jorge Daniel, et Ignacio Iturrioz. 2012. « The Gutenberg-Richter and similar laws and their relation with numerical and experimental laboratory results ». In *15th World Conf. on Earth. Eng., Paper*, t. 5827.
- Risk Management Policies, Futures Project on. 2006. *Japan : Earthquakes*. Rapport technique. OCDE.
- Salgado, Mario A, Martha L Carreño, Alex H Barbat et Omar D Cardona. 2014. « Comparing a simulated loss scenario with the observed Earthquake damage : The Lorca 2011 case study ». In *Proceedings of the Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology. Istanbul, Turkey*.
- Silva, Vitor, Helen Crowley, Marco Pagani, Damiano Monelli et Rui Pinho. 2014. « Development of the OpenQuake engine, the Global Earthquake Model's open-source software for seismic risk assessment ». *Natural Hazards* 72 (3) : 1409–1427.
- Spence, RJS, et EKM So. 2011. « Human casualties in earthquakes : modelling and mitigation ». In *Proceedings of the ninth Pacific conference on earthquake engineering, Auckland, New Zealand*.
- Trendafiloski, G, M Wyss et Ph Rosset. 2011. « Loss estimation module in the second generation software QLARM ». In *Human Casualties in Earthquakes*, 95–106. Springer.
- Utsu, T. 2004. « Catalog of Damaging Earthquakes in the World ». *Intl. Inst. of Seismol. and Earthquake Eng., Tsukuba, Japan*.
- Wyss, Max, Anastasia Nekrasova et Vladimir Kossobokov. 2012. « Errors in expected human losses due to incorrect seismic hazard estimates ». *Natural hazards* 62 (3) : 927–935.
- Yamaguchi, Naoya, et Fumio Yamazaki. 2000. « Fragility curves for buildings in Japan based on damage surveys after the 1995 Kobe earthquake ». In *12th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Yamato, Satoshi. s.d. « The Tradition of Wooden Architecture in Japan ».



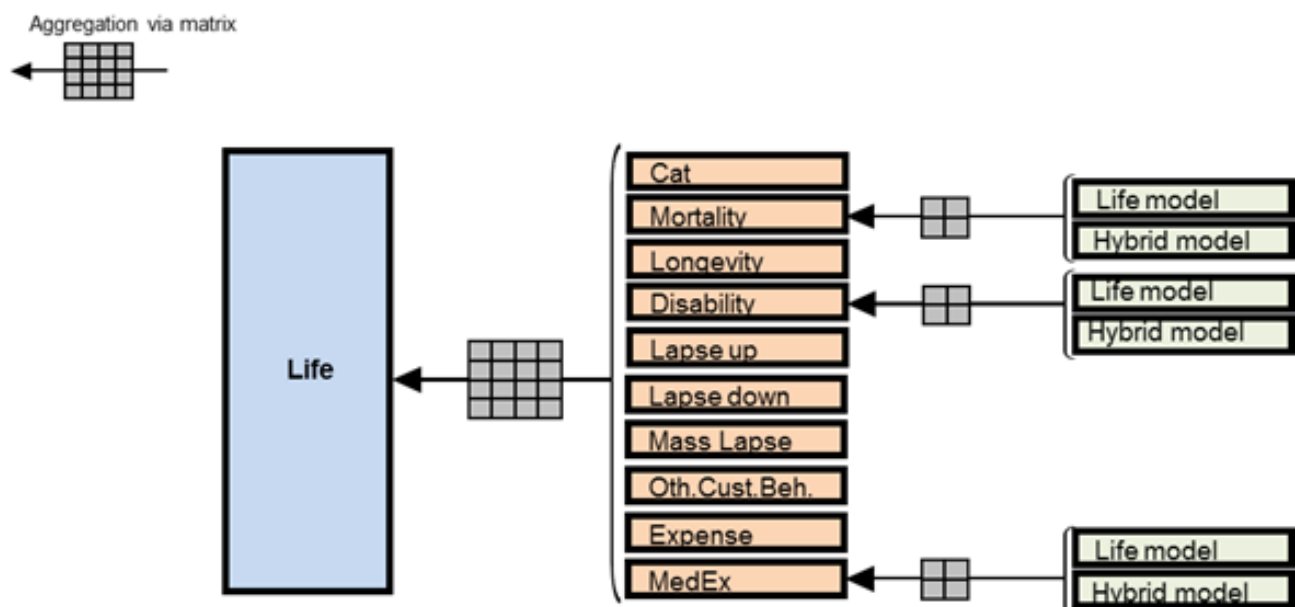
Yamazaki, Fumio, Akiyoshi Nishimura et Yasuhiro Ueno. 1996. « Estimation of human casualties due to urban earthquakes ». In *Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico*.

# Annexes

## A Le groupe AXA dans le monde



## B Agrégation des risques vie



## C Densité de population au Japon

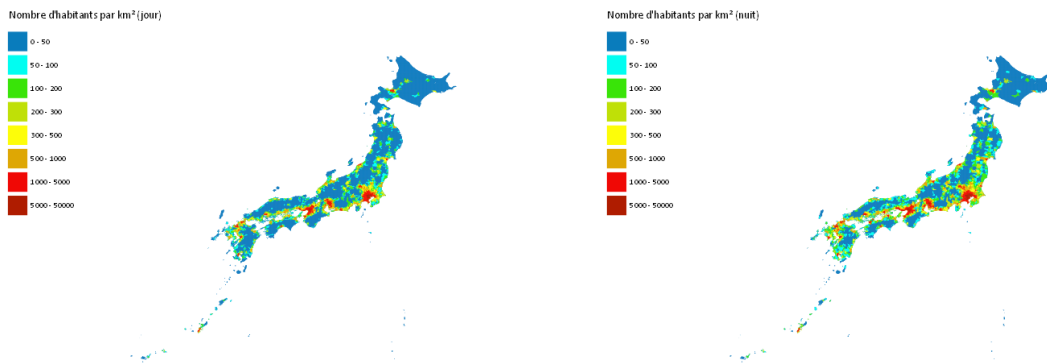


FIGURE 26 – Densité de population au Japon jour et nuit (Gamba et al. 2012)

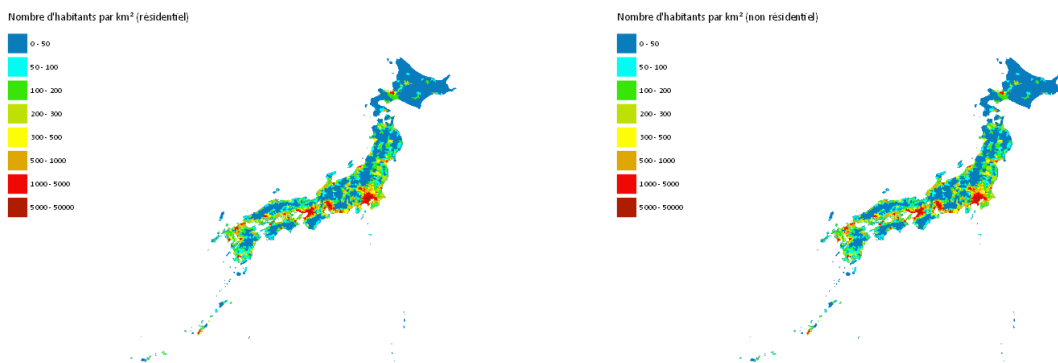


FIGURE 27 – Densité de population typique résidentielle et non résidentielle au Japon (Gamba et al. 2012)

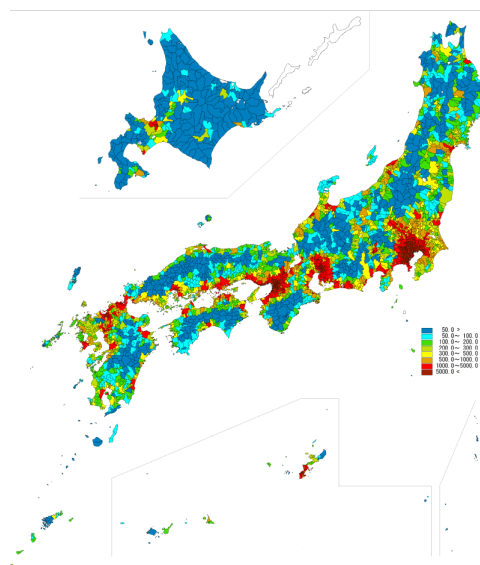


FIGURE 28 – Densité de population au Japon en 2000 (Bureau 2000)



## D Paramètres des courbes de fragilité

TABLE 16 – Paramètres des courbes de fragilité utilisés (1)

Type	Code	État	Moyenne	Écart-type
C2L	Élevé	Faible	0.2945	0.2096
C2L	Élevé	Modéré	0.5523	0.3929
C2L	Élevé	Large	1.1046	0.7859
C2L	Élevé	Complet	1.9023	1.3535
C2L	Faible	Faible	0.1718	0.1222
C2L	Faible	Modéré	0.2332	0.1659
C2L	Faible	Large	0.3682	0.262
C2L	Faible	Complet	0.6382	0.4541
C2L	Modéré	Faible	0.2209	0.1572
C2L	Modéré	Modéré	0.3682	0.262
C2L	Modéré	Large	0.6014	0.4279
C2L	Modéré	Complet	1.0677	0.7597
C2L	Antérieur	Faible	0.135	0.0961
C2L	Antérieur	Modéré	0.1841	0.131
C2L	Antérieur	Large	0.2945	0.2096
C2L	Antérieur	Complet	0.5155	0.3667
W1	Élevé	Faible	0.3191	0.227
W1	Élevé	Modéré	0.675	0.4803
W1	Élevé	Large	1.5709	1.1177
W1	Élevé	Complet	2.4668	1.7551
W1	Faible	Faible	0.2455	0.1746
W1	Faible	Modéré	0.4173	0.2969
W1	Faible	Large	0.7486	0.5326
W1	Faible	Complet	1.1659	0.8295
W1	Modéré	Faible	0.2945	0.2096
W1	Modéré	Modéré	0.5277	0.3755
W1	Modéré	Large	1.1168	0.7946
W1	Modéré	Complet	1.6446	1.1701
W1	Antérieur	Faible	0.2209	0.1572
W1	Antérieur	Modéré	0.3559	0.2532
W1	Antérieur	Large	0.6259	0.4453
W1	Antérieur	Complet	0.945	0.6724
W2	Élevé	Faible	0.3191	0.227
W2	Élevé	Modéré	0.6873	0.489
W2	Élevé	Large	1.4114	1.0042
W2	Élevé	Complet	2.5527	1.8162
W2	Faible	Faible	0.1718	0.1222
W2	Faible	Modéré	0.2823	0.2008
W2	Faible	Large	0.5891	0.4191
W2	Faible	Complet	0.9205	0.6549
W2	Modéré	Faible	0.2455	0.1746
W2	Modéré	Modéré	0.4295	0.3056

TABLE 17 – Paramètres des courbes de fragilité utilisés (2)

Type	Code	État	Moyenne	Écart-type
W2	Modéré	Large	0.7855	0.5588
W2	Modéré	Complet	1.3868	0.9867
W2	Antérieur	Faible	0.1473	0.1048
W2	Antérieur	Modéré	0.2332	0.1659
W2	Antérieur	Large	0.4541	0.3231
W2	Antérieur	Complet	0.7364	0.5239
RM2	Élevé	Faible	0.2086	0.1484
RM2	Élevé	Modéré	0.405	0.2882
RM2	Élevé	Large	0.9205	0.6549
RM2	Élevé	Complet	2.2459	1.5979
RM2	Faible	Faible	0.1473	0.1048
RM2	Faible	Modéré	0.2086	0.1484
RM2	Faible	Large	0.4173	0.2969
RM2	Faible	Complet	0.7364	0.5239
RM2	Modéré	Faible	0.1964	0.1397
RM2	Modéré	Modéré	0.2823	0.2008
RM2	Modéré	Large	0.5891	0.4191
RM2	Modéré	Complet	1.215	0.8645
RM2	Antérieur	Faible	0.1227	0.0873
RM2	Antérieur	Modéré	0.1718	0.1222
RM2	Antérieur	Large	0.3191	0.227
RM2	Antérieur	Complet	0.5768	0.4104
C1	Élevé	Faible	0.1841	0.131
C1	Élevé	Modéré	0.3314	0.2358
C1	Élevé	Large	0.8959	0.6374
C1	Élevé	Complet	1.9759	1.4058
C1	Faible	Faible	0.1473	0.1048
C1	Faible	Modéré	0.2086	0.1484
C1	Faible	Large	0.3927	0.2794
C1	Faible	Complet	0.6627	0.4715
C1	Modéré	Faible	0.1595	0.1135
C1	Modéré	Modéré	0.2577	0.1834
C1	Modéré	Large	0.6014	0.4279
C1	Modéré	Complet	1.0923	0.7771
C1	Antérieur	Faible	0.1105	0.0786
C1	Antérieur	Modéré	0.1595	0.1135
C1	Antérieur	Large	0.3191	0.227
C1	Antérieur	Complet	0.5277	0.3755
C4	Élevé	Faible	0.2086	0.1484
C4	Élevé	Modéré	0.4418	0.3144
C4	Élevé	Large	1.0677	0.7597
C4	Élevé	Complet	2.3932	1.7027
C4	Faible	Faible	0.1473	0.1048
C4	Faible	Modéré	0.2332	0.1659
C4	Faible	Large	0.4664	0.3318

TABLE 18 – Paramètres des courbes de fragilité utilisés (3)

Type	Code	État	Moyenne	Écart-type
C4	Faible	Complet	0.7732	0.5501
C4	Modéré	Faible	0.1841	0.131
C4	Modéré	Modéré	0.3191	0.227
C4	Modéré	Large	0.675	0.4803
C4	Modéré	Complet	1.2518	0.8907
C4	Antérieur	Faible	0.1227	0.0873
C4	Antérieur	Modéré	0.1841	0.131
C4	Antérieur	Large	0.3682	0.262
C4	Antérieur	Complet	0.6136	0.4366
S1	Élevé	Faible	0.1718	0.1222
S1	Élevé	Modéré	0.3191	0.227
S1	Élevé	Large	0.7609	0.5414
S1	Élevé	Complet	1.755	1.2487
S1	Faible	Faible	0.1473	0.1048
S1	Faible	Modéré	0.2209	0.1572
S1	Faible	Large	0.3559	0.2532
S1	Faible	Complet	0.6014	0.4279
S1	Modéré	Faible	0.1595	0.1135
S1	Modéré	Modéré	0.2577	0.1834
S1	Modéré	Large	0.54	0.3842
S1	Modéré	Complet	1.0064	0.716
S1	Antérieur	Faible	0.1105	0.0786
S1	Antérieur	Modéré	0.1718	0.1222
S1	Antérieur	Large	0.2823	0.2008
S1	Antérieur	Complet	0.4786	0.3405
S2	Élevé	Faible	0.1718	0.1222
S2	Élevé	Modéré	0.3314	0.2358
S2	Élevé	Large	0.8959	0.6374
S2	Élevé	Complet	1.9882	1.4146
S2	Faible	Faible	0.1473	0.1048
S2	Faible	Modéré	0.2209	0.1572
S2	Faible	Large	0.4295	0.3056
S2	Faible	Complet	0.7118	0.5065
S2	Modéré	Faible	0.1718	0.1222
S2	Modéré	Modéré	0.27	0.1921
S2	Modéré	Large	0.6505	0.4628
S2	Modéré	Complet	1.1905	0.847
S2	Antérieur	Faible	0.1227	0.0873
S2	Antérieur	Modéré	0.1718	0.1222
S2	Antérieur	Large	0.3436	0.2445
S2	Antérieur	Complet	0.5768	0.4104
S4	Élevé	Faible	0.1964	0.1397
S4	Élevé	Modéré	0.3436	0.2445
S4	Élevé	Large	0.8959	0.6374
S4	Élevé	Complet	1.9146	1.3622

TABLE 19 – Paramètres des courbes de fragilité utilisés (4)

Type	Code	État	Moyenne	Écart-type
S4	Faible	Faible	0.1473	0.1048
S4	Faible	Modéré	0.2086	0.1484
S4	Faible	Large	0.3805	0.2707
S4	Faible	Complet	0.6627	0.4715
S4	Modéré	Faible	0.1718	0.1222
S4	Modéré	Modéré	0.27	0.1921
S4	Modéré	Large	0.6259	0.4453
S4	Modéré	Complet	1.1291	0.8033
S4	Antérieur	Faible	0.1105	0.0786
S4	Antérieur	Modéré	0.1595	0.1135
S4	Antérieur	Large	0.3068	0.2183
S4	Antérieur	Complet	0.5277	0.3755





## E Facteurs d'ajustement de la population de la GED par rapport au dernier recensement

TABLE 20 – Facteurs d'ajustement de la population totale par préfecture (1)

Nom de la préfecture	Facteur d'ajustement
Aichi-ken	107%
Akita-ken	85%
Aomori-ken	87%
Chiba-ken	111%
Ehime-ken	92%
Fukui-ken	94%
Fukuoka-ken	102%
Fukushima-ken	90%
Gifu-ken	95%
Gumma-ken	95%
Hiroshima-ken	99%
Hokkaido	94%
Hyogo-ken	99%
Ibaraki-ken	96%
Ishikawa-ken	97%
Iwate-ken	89%
Kagawa-ken	98%
Kagoshima-ken	92%
Kanagawa-ken	109%
Kochi-ken	89%
Kumamoto-ken	95%
Kyoto-fu	97%
Mie-ken	98%
Miyagi-ken	99%
Miyazaki-ken	94%
Nagano-ken	94%
Nagasaki-ken	90%
Nara-ken	96%
Niigata-ken	92%
Oita-ken	95%
Okayama-ken	96%
Okinawa-ken	109%
Osaka-fu	100%
Saga-ken	92%
Saitama-ken	102%
Shiga-ken	105%
Shimane-ken	84%
Shizuoka-ken	98%
Tochigi-ken	97%
Tokushima-ken	92%
Tokyo-to	111%
Tottori-ken	103%

TABLE 21 – Facteurs d’ajustement de la population totale par préfecture (2)

Nom de la préfecture	Facteur d’ajustement
Toyama-ken	95%
Wakayama-ken	91%
Yamagata-ken	88%
Yamaguchi-ken	91%
Yamanashi-ken	93%