Mémoire présenté le : 11/07/2017

pour l'obtention du Diplôme Universitaire d'actuariat de l'ISFA
et l'admission à l'Institut des Actuaires

Par : Rudy MUSTAFA

Titre : Assurer le risque nucléaire

Confidentialité : ☒ NON ☐ OUI (Durée : ☐ 1 an ☐ 2 ans)

Les signataires s'engagent à respecter la confidentialité indiquée ci-dessus.

Membres présents du jury de l'IA *Signature*

M. David VALLEE

M. Christian FETTIG

Membres présents du jury de l'ISFA

M. Xavier MILHAUD

Entreprise AXA GIE

Nom :

Signature :

Directeur de mémoire en entreprise

Nom : M. Alexandre HASSLER

Signature :

Invité

Nom : M. Sylvain BUISINE

Signature :

Autorisation de publication et de mise en ligne sur un site de diffusion de documents actuariels *(après expiration de l'éventuel délai de confidentialité)*

Signature du responsable entreprise

Signature du candidat

Secrétariat :
Mme Christine DRIGUZZI
Bibliothèque :
Mme Patricia BARTOLO

Résumé

Aucune approche actuarielle standard ne permet de mesurer efficacement le risque d'accident nucléaire auquel l'assureur peut faire face. De par sa nature spécifique et complexe, ce risque rare et d'une sévérité extrême est difficilement quantifiable de manière purement statistique. En outre, le caractère hautement sensible des installations nucléaires fait que la confidentialité est de mise dans ce secteur, ainsi les informations à leur sujet se font rares.

Néanmoins, l'évolution prochaine du cadre juridique en matière de responsabilité civile nucléaire (Convention de Paris), bouleversera considérablement les montants à allouer au titre de l'indemnisation des victimes. Celle-ci portera en effet le montant minimum de couverture dont doit disposer l'exploitant de 91,5 millions à 700 millions d'euros, tout en supprimant la clause d'exonération de sa responsabilité en cas d'accidents nucléaires consécutifs à des « cataclysmes naturels de caractère exceptionnel ». Ainsi, les garants financiers dont l'assureur fait partie, seront directement impactés par ces changements. Devant ce constat, l'assureur concerné par le risque nucléaire se doit de réagir et d'anticiper les éventuelles conséquences de ces modifications à venir.

C'est dans ce contexte, que se situe la réflexion effectuée dans ce mémoire. L'entrée en vigueur prochaine des évolutions du cadre juridique, a fait naître la volonté d'identifier les nouveaux scénarios extrêmes possibles pour l'assureur, et ce dans le cas particulier des tremblements de terre.

Après avoir décrit et analysé le cadre juridique spécifique en matière de responsabilité civile nucléaire, ce mémoire évoquera l'organisation du marché de l'assurance face à ce risque si particulier. Ensuite, en se focalisant sur la centrale nucléaire de Fessenheim, il sera proposé une méthodologie qui, en partant de la simulation de l'aléa sismique à la création d'un générateur de pertes économiques, permettra de quantifier l'impact d'événements sismiques majeurs sur le risque d'accident nucléaire. Enfin, une discussion autour des conséquences d'une catastrophe nucléaire pour l'assureur sera proposée.

Mots clés : Risque nucléaire, Fessenheim, aléa sismique, loi de Gutenberg-Richter, accélération maximale du sol, théorie des valeurs extrêmes, distribution de Pareto généralisée, *Bootstrap*, traitement d'image non structurée, *Raster*, géoréférencement, zonage sismotectonique, Convention de Paris, Convention complémentaire de Bruxelles, Pools de co(ré)assurance.

Abstract

There is no standard actuarial approach to effectively measuring the risk of a nuclear accident to which the insurer may be exposed. Due to its specific and complex nature, this rare and extremely severe risk is difficult to quantify in a purely statistical way. In addition, most of the information about nuclear plants is confidential which makes it hard to collect.

Nevertheless, the future evolution of the nuclear third party liability regime (Paris Convention) will considerably change the amounts allocated for victims compensation. In fact, the amount of a nuclear operator's liability (91,5 M€ today) will be raised to an amount not less than 700 million euros. Moreover, the exclusion clause of its liability in case of nuclear accidents due to a « grave natural disaster of an exceptional character » will be removed. Thus, as a financial guarantor, the insurer will be directly impacted by those changes. That's why, the insurer concerned by nuclear risk must react and anticipate the possible consequences of the future modifications.

It is in this particular context that this study takes place. The upcoming entry into force of the legal framework has given rise to a thought for anticipating the new possible extreme scenarios which might impact the insurer in the particular case of earthquakes.

After describing and analyzing the specific legal framework for nuclear third party liability, the organization of the insurance market against this particular risk will be presented. Then, based on the Fessenheim nuclear power plant, a method to assess the economic losses of a nuclear accident caused by an earthquake will be developed. From the simulation of the seismic hazard to the creation of an economic losses generator, this method will help to quantify the impact of major seismic events on the nuclear accident risks. Finally, a discussion on the consequences of a nuclear disaster for the insurer will be proposed.

Key words : Nuclear risk, Fessenheim, seismic hazard, Gutenberg-Richter law, peak ground acceleration, extreme value theory, generalized Pareto distribution, Bootstrap, unstructured image processing, Raster, georeferencing, Paris Convention, Brussels Supplementary Convention, co(re)inssurance Pools.

Remerciements

Je tiens spécialement à remercier mon maître de stage, Alexandre HASSLER, qui m'a accordé sa confiance pour initier ces travaux sur le risque nucléaire. Je te souhaite plein de succès dans tes nouveaux projets.

Merci à Christophe DUTANG pour son encadrement, sa grande disponibilité tout au long de l'élaboration de ce mémoire. J'en profite également pour remercier l'ensemble du corps enseignant de l'IRA du Mans sans qui, je n'aurais jamais eu l'occasion de rejoindre l'ISFA.

Merci à Sylvain BUISINE et à Sofiane KASMI pour leurs relectures et leurs précieuses remarques. Vous avez toujours su me redonner espoir dans les moments de doute.

Merci à Adrien POTHON pour ses conseils en sismologie. Je te souhaite un bon courage pour ta thèse.

Merci à ma petite amie Andreia pour son soutien moral durant cette dernière période chargée.

Et bien sûr un grand merci à toute l'équipe P&C du GRM pour leur sympathie au quotidien. C'est un plaisir de travailler avec vous depuis bientôt un an !

Sommaire

Résumé

Abstract

Remerciements

Introduction **12**

Partie 1 : Analyse du cadre juridique spécifique de responsabilité civile nucléaire

1 Convention de Paris du 29 juillet 1960 sur la responsabilité civile dans le domaine de l'énergie nucléaire **15**

1.1 Convention de Paris en vigueur 16

1.2 Convention complémentaire de Bruxelles 18

1.3 Protocoles du 12 février 2004 modifiant la Convention de Paris et la Convention Complémentaire de Bruxelles 19

1.4 Conséquences du Protocole sur le plan de l'assurance 20

2 Convention de Vienne **21**

2.1 Synthèse des évolutions apportées par le Protocole d'amendement de 1997 22

3 Réglementation en vigueur en France : une situation ambiguë **24**

Partie 2 : Organisation du marché de la réassurance face au risque nucléaire

1 Placement d'une police Nucléaire et opération de *fronting* **26**

2 Le modèle français : Assuratome **28**

2.1 Les autres acteurs du marché français 29

3 Autres modèles notables **30**

3.1 Modèle Américain : Le Price-Anderson Act 30

3.2 Modèle Belge : Le SYBAN 31

Partie 3 : Étude du risque sismique sur le site de Fessenheim : évaluation de l'aléa et quantification du risque pour l'assureur

1 Motivations et objectifs de l'étude **32**

2 Éléments de base en sismologie **33**
2.1 Magnitude d'un séisme 33
2.2 Accélération maximale du sol 35

3 Mise en place de la méthodologie **36**
3.1 Vue d'ensemble de la méthodologie de modélisation 36
3.2 Analyse des normes parasismiques en vigueur 37
3.3 Sélection d'un catalogue de sismicité approprié 40
3.4 Quantification de l'impact d'un séisme 41
3.4.1 Modélisation déterministe de l'accélération maximale du sol . . . 42
3.4.2 Conversion M_w en M_l 44
3.5 Préparation de la carte des régions sismotectoniques 45
3.5.1 Principe de base de l'analyse d'image 45
3.5.2 Traitement de l'image des régions sismotectoniques 46

4 Préparation des entrées du modèle **51**
4.1 Extraction d'un sous-catalogue de sismicité 51
4.2 Détermination du seuil de résistance théorique 52
4.3 Modélisation de la magnitude des séismes 55
4.3.1 Loi de Gutenberg-Richter 55
4.3.2 Modèle de régression linéaire simple et estimateur MCO 56
4.3.3 Estimateur du maximum de vraisemblance (EMV) dans un cadre continu 58
4.3.4 Méthode du *bootstrap* 59
4.4 Choix du seuil et estimation du paramètre b (*b-value)* 62
4.5 Résultats de l'estimation de la magnitude de complétude et de la *b-value* . 63
4.6 Prise en compte de l'historique propre à chaque zone 66
4.7 Modélisation de la survenance des séismes 69
4.8 Modélisation de la localisation des séismes 70
4.9 Simulation de l'accélération maximale au sol 71

5 Analyse des résultats **72**
5.1 Vue d'ensemble des résultats 72
5.2 *Benchmark* des résultats 73

6 Modélisation de la queue de distribution du *PGA* **75**
6.1 Éléments théoriques sur les dépassements de seuil 76
6.1.1 Distribution de Pareto généralisée 76
6.1.2 Estimation des paramètres par EMV 77

6.1.3 Détermination du seuil 78
6.1.4 Estimation d'un quantile d'ordre élevé 78
6.2 Application à la distribution du *PGA* 79
6.2.1 Sélection du seuil et ajustement de la *GPD* 79
6.2.2 Estimation de la période de retour du seuil de résistance théorique de Fessenheim 81

7 Modélisation du coût économique 82
7.1 Construction de classes de dommages potentiels 82
7.1.1 Scénarios extrêmes des classes (5) et (6) 84
7.1.2 Scénarios de la classe (4) 86
7.1.3 Scénarios des classes (2) et (3) 87
7.1.4 Segmentation des coûts intra-classe par garantie 88
7.1.5 Récapitulatif de la construction des classes 89
7.2 Création d'un générateur de pertes extrêmes 90
7.2.1 Mécanisme du générateur de perte 90
7.2.2 Calibration d'une loi de coût 90
7.3 Résumé du mécanisme du générateur de pertes 93
7.4 Exemple de résultat du générateur 93
7.5 Limites et axes d'amélioration du modèle 94

8 Conséquences pour le secteur de l'assurance 95

Conclusion 97

Annexes
A Reproduction de l'article 1 (a) et (b) de la Convention de Paris de 1960, amendée en 1964 et 1982 99
B Reproduction de l'article 12 de la Convention de Bruxelles de 1963, amendée en 1964 et 1982 100
C Description de l'échelle INES 101
D Échelle MSK (1964) 102
E Carte des séismes de référence par zone sismotectonique. 103
F Table des résultats de la procédure d'estimation du seuil 104
G Résultat de l'estimation des paramètres de la loi de coût économique . . . 105

Liste des figures 107

Liste des tableaux 109

Glossaire 110

«It's impossible that the improbable will never happen.»
Emil Julius Gumbel

Introduction

Aujourd'hui, les mesures drastiques auxquelles sont soumises les installations nucléaires (particulièrement les centrales et leurs réacteurs) semblent garantir un haut niveau de sûreté en réduisant considérablement le risque de catastrophe nucléaire. Aussi, aucun accident majeur n'a été déploré en France. Cependant, les catastrophes de Tchernobyl (1986) ou plus récemment Fukushima (2011) viennent nous rappeler que le risque zéro n'existe pas et que les conséquences de tels événements peuvent être dévastatrices et durables.

En France, deux organismes principaux l'autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) et l'institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) travaillent en étroite collaboration et ont pour objectif commun d'évaluer les risques sous-jacents de l'industrie nucléaire. L'ASN, en plus des missions de contrôle et d'information du public, joue un rôle majeur dans l'élaboration de la réglementation. Elle représente la seule autorité compétente capable d'autoriser la mise en service d'une installation nucléaire. Elle est également habilitée, en cas de force majeure, à suspendre l'activité de cette dernière. L'IRSN quant à elle, mène également divers travaux de recherche ayant pour but d'améliorer la sûreté. Néanmoins, elle n'est pas qualifiée pour édicter la réglementation. Elle joue ainsi un rôle de conseil auprès de l'ASN.

Au fil du temps, d'énormes progrès ont été réalisés sur la prévention, ainsi que sur la compréhension des conséquences humaines et environnementales en cas de catastrophe. En revanche, l'expérience douloureuse de Tchernobyl dont les montants sont régulièrement revus à la hausse, illustre la difficulté d'évaluer la répercussion financière d'un accident majeur. Ainsi, même si *a priori* l'étude de ces risques semble plutôt du ressort des scientifiques et des ingénieurs spécialisés dans le nucléaire, l'assureur en tant qu'apporteur de garanties financières est directement concerné.

Aujourd'hui plus que jamais, il est nécessaire pour l'assureur d'adopter une vision prospective de ces risques afin de mieux les comprendre et de les quantifier. En effet, le protocole d'amendement [1] de 2004 portant modification à la Convention de Paris, pourrait prochainement entrer en vigueur. Celui-ci portera les montants de responsabilité de l'exploitant d'une centrale nucléaire à 700 millions d'euros minimum pour les dommages corporels (contre 91,5 millions d'euros actuellement en France), et allongera leurs durées de prescription de 10 à 30 ans, modifiant considérablement la charge du responsable en cas d'accident. Par ailleurs, le tsunami (consécutif au séisme de Tohoku) provoquant l'accident nucléaire de Fukushima a fait prendre conscience que les centrales peuvent être vulnérables face à des catastrophes naturelles de grande ampleur. Le protocole de 2004 ne prévoyant plus d'exonération de responsabilité en cas de catastrophe naturelle, l'assureur sera donc soumis à un risque plus grand. Par conséquent, là où l'assureur est relativement peu exposé aujourd'hui, l'entrée en vigueur du protocole entraînera demain une augmentation substantielle de son exposition au risque nucléaire.

C'est précisément cette évolution du cadre juridique et les nouveaux risques qui pèseront implicitement sur l'assureur qui ont suscité l'élaboration de ce mémoire. En particulier, ces futures transformations réglementaires nous ont conduits à réfléchir à une question précise, celle de la vulnérabilité des centrales nucléaires françaises face aux tremblements de terre.

1. Les conséquences des modifications de la Convention de Paris par le protocole d'amendement de 2004 seront développées dans la première partie du mémoire.

En substance, le but poursuivi dans ce mémoire se situe à mi-chemin entre, d'une part, une meilleure évaluation du risque d'accident nucléaire consécutivement à un séisme et, d'autre part, une meilleure compréhension des évolutions juridiques à venir. Celui-ci n'a pas pour vocation de prendre partie sur la question du nucléaire. L'intention étant d'améliorer la connaissance de ce risque sur le plan assurantiel de manière objective et de proposer des pistes pour mieux le quantifier.

Dans cet effort, nous présenterons tout d'abord au lecteur le cadre juridique spécifique en matière de responsabilité civile nucléaire. Nous verrons que les dispositions des différentes conventions internationales peuvent parfois être complexes et sujettes à interprétation.

Ensuite, nous aborderons l'organisation de l'assurance autour des risques nucléaires, et tout particulièrement le mécanisme et la structure des pools de coréassurance existants, notamment à travers le modèle Français : Assuratome. Cette section sera également l'occasion de présenter le fonctionnement d'autres modèles étrangers.

Enfin, la dernière partie sera destinée à apporter une réponse au besoin de quantification du risque d'accident nucléaire suite à un tremblement de terre. En se basant sur les normes parasismiques en vigueur pour les centrales nucléaires françaises, nous construirons nous même, pas-à-pas, un modèle d'aléa sismique sur le site nucléaire de Fessenheim. Ce module d'aléa, nous permettra finalement d'alimenter un générateur préalablement construit de pertes. *In fine*, ce générateur pourra servir à élaborer des scénarios extrêmes de pertes nettes pour l'assureur lors de l'entrée en vigueur du Protocole d'amendement de 2004. La méthodologie que nous proposerons pourra ensuite être étendue à d'autre sites nucléaires français. Tout au long de cette partie nous aborderons les difficultés rencontrées et essaierons d'être clair sur les choix effectués, car comme nous le verrons, les informations disponibles autour du risque nucléaire se font rares.

Partie 1 : Analyse du cadre juridique spécifique de responsabilité civile nucléaire

Dès la fin de la seconde guerre mondiale, de nombreuses nations disposant d'un programme de recherche sur l'énergie atomique se sont rapidement orientées vers des applications dans le domaine civil, notamment dans la production d'électricité à travers les centrales nucléaires. Dans un environnement post-guerre où l'Europe ruinée cherche à se reconstruire, cette technologie offre un moyen de produire de l'électricité à bas coût et présente ainsi un fort intérêt économique.

En France, l'avènement de l'énergie nucléaire se matérialisa par la création du CEA [2] par le Général de Gaulle le 18 octobre 1945 et la mise en service en 1956 du premier réacteur de recherche produisant de l'électricité en Europe de l'ouest. Aujourd'hui, en phase de démantèlement ce réacteur construit par le CEA sur le site de Marcoules symbolise le point de départ du développement du parc nucléaire Européen.

Bien que révolutionnaire pour l'époque, cette nouvelle technologie engendra de nouveaux risques aussi bien pour l'homme que pour l'environnement. Face à leurs particularités et leurs éventuelles conséquences dévastatrices à l'échelle internationale, les États d'Europe occidentale ont été amenés à établir un cadre juridique spécifique adapté aux risques nucléaires en matière de responsabilité civile. En effet, le droit commun ne semble pas être une solution envisageable, de fait son application entraînerait probablement plusieurs responsables potentiels en cas d'accident nucléaire. Dans ce cas, il est plausible que la responsabilité soit extrêmement difficile à déterminer, ce qui aurait pour effet de retarder l'indemnisation des victimes par la multiplication des procédures judiciaires. De plus, pour le responsable le montant des réparations pouvant être colossal et sa responsabilité illimitée, celui-ci pourrait ne pas être complètement couvert par son assurance et ainsi être dans l'incapacité de dédommager entièrement les victimes.

L'instauration d'un régime spécial de responsabilité civile a été principalement motivée par la nécessité de pallier les problèmes précédemment exposés. Effectivement, en cas d'accident nucléaire majeur, il serait primordial que le processus d'indemnisation des victimes soit le plus simple et efficace possible. En contrepartie, il semblerait raisonnable de limiter la responsabilité de la personne [3] ayant causée l'accident afin de ne pas entraver le développement d'une industrie naissante par une charge trop lourde en cas de responsabilité illimitée.

Néanmoins, en raison du contexte géopolitique difficile des années 50-60 dû à la guerre froide, cette volonté de créer un régime spécifique de responsabilité civile nucléaire n'a pu aboutir à un unique instrument international. Ainsi, bien qu'analogue, deux Conventions distinctes existent et régissent ce régime spécifique. D'un côté, la Convention de Paris (1960) est majoritairement composée d'États d'Europe occidentale, tandis que la Convention de Vienne (1963) regroupe principalement les États de l'ancien bloc Soviétique et divers pays en-dehors de l'Europe.

En réponse à ces problèmes, ces deux Conventions présentées ci-après s'articulent autour d'un socle commun basé sur les principes fondamentaux suivants :

- Responsabilité objective et exclusive de l'exploitant de l'installation nucléaire :

2. Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives.
3. Personne physique ou morale, publique ou privée.

  - il est entendu par responsabilité objective, le fait que l'exploitant est considéré comme responsable de tout préjudice aux personnes et aux biens consécutif à un accident survenu dans son installation, et ce, sans que les victimes aient à prouver la faute. Dès lors, qu'un lien de causalité est établi entre la faute et le dommage la responsabilité de l'exploitant peut-être engagée. L'exclusivité de la responsabilité signifie que l'exploitant est le seul et unique responsable en cas d'accident nucléaire, tous les autres participants comme le constructeur, le sous-traitant ou le fournisseur étant déchargés de toute responsabilité.
- Limitation de la responsabilité aussi bien en montant qu'en durée ;
- Obligation de couverture de l'exploitant par une assurance ou par une toute autre garantie financière dans le but de garantir l'indemnisation des victimes ;
- Volonté d'uniformisation des règles de responsabilité civile entre les parties contractantes :
  - le but étant de traiter équitablement les victimes indépendamment du lieu de l'accident ou du dommage, tant que l'un ou l'autre événement s'est produit sur le territoire d'une partie à la Convention.
- Une unique juridiction compétente, celle où l'accident nucléaire s'est produit.

1 Convention de Paris du 29 juillet 1960 sur la responsabilité civile dans le domaine de l'énergie nucléaire

La Convention de Paris (1960) (pouvant être désignée par CP dans la suite) est la première Convention internationale à instaurer un régime spécifique de responsabilité civile en cas d'accident nucléaire. À ce stade de son existence celle-ci a été amendée trois fois par les Protocoles de 1964, 1982 et 2004. Le Protocole additionnel adopté en 1964 correspond à la Convention complémentaire de Bruxelles (1963), qui comme nous le verrons dans la suite prévoit des tranches d'indemnisation supplémentaires.

Les Parties Contractantes à la Convention de Paris sont majoritairement des pays d'Europe occidentale. Le dernier recensement du statut [4] des ratifications et des accessions fait état de 15 pays où la Convention est actuellement entrée en vigueur. La liste complète des pays signataires ainsi que le statut des ratifications sont donnés en figure 1.

Parmi les états signataires seulement deux pays n'ont pas déposés leurs instruments de ratification, il s'agit du Luxembourg et de l'Autriche. La Suisse ayant déposé son instrument de ratification pour la Convention de Paris telle qu'amendée par les trois Protocoles de manière tardive, la Convention ne s'appliquera à celle-ci que lorsque le Protocole d'amendement de 2004 entrera lui même en vigueur.

Douze ans après sa signature, son entrée en vigueur est toujours bloquée par la décision du conseil de l'Union européenne du 8 mars 2004, qui impose aux pays membres de l'UE un dépôt simultané de leurs instruments de ratification (art. 2). Or, d'après l'article 20 de la Convention de Paris, le Protocole ne pourra entrer en vigueur qu'à partir du moment où il sera ratifié par les deux tiers des Parties Contractantes. Par conséquent, comme 13 des 16 Parties Contractantes sont membres de l'UE et que la Belgique, le Royaume-Uni et l'Italie n'ont toujours pas achevés leurs processus de ratification, l'entrée en vigueur du

4. Statut au 30/07/2015 disponible sur le site internet de l'OCDE-AEN à cette adresse.

Protocole est retardée. Ajoutons à cela que la sortie annoncée du Royaume-Uni après le *Brexit* complique encore plus l'entrée en vigueur du Protocole.

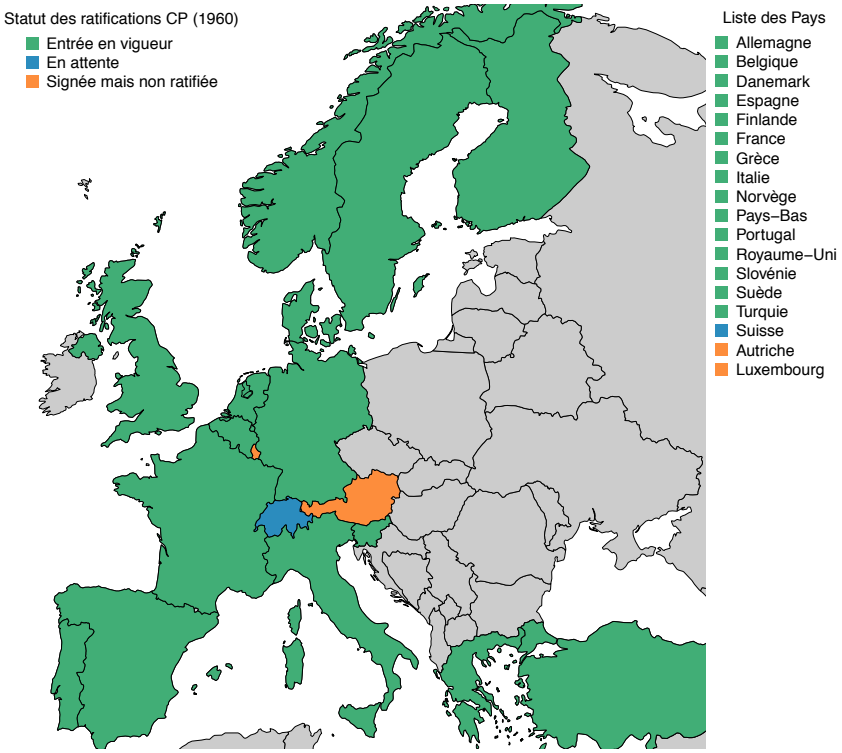


Fig. 1 - Carte du statut des ratifications (CP 1960) d'après l'OCDE au 30/07/2015.

1.1 Convention de Paris en vigueur

Actuellement, la Convention de Paris en vigueur est celle telle qu'amendée en 1982. Dans cette version, le régime de responsabilité civile nucléaire couvre les dommages résultant d'un accident nucléaire survenu au cours d'un transport ou dans une installation nucléaire. En cas d'accident, la responsabilité de l'exploitant est immédiatement engagée par le principe de responsabilité objective.

Où d'après l'article 1 (a) et (b) de la Convention :

- Le terme "accident nucléaire" désigne un ou plusieurs événements ayant une origine commune et provoquant des dommages imputables à une activité nucléaire ;
- Le terme "installation nucléaire" désigne de façon générale les installations où des combustibles ou des substances nucléaires sont utilisés. Les principales installations visées par la Convention étant les réacteurs de centrale nucléaire ; les usines de séparation des isotopes ; les usines de retraitement de combustibles irradiés, ou encore les centres de stockage de substances nucléaire. De plus, une Partie Contractante est libre de définir un site regroupant plusieurs installations nucléaires ayant le même exploitant comme une unique installation nucléaire ;
- Le terme "exploitant" désigne la personne reconnue par l'autorité comme l'exploitant d'une installation nucléaire. C'est également la personne dont la responsabilité est engagée en cas d'accident nucléaire.

Pour le lecteur désirant plus de précisions sur ces termes, l'article 1 de la Convention

de Paris de 1960 amendée en 1964 et 1982 publiée sur le site de l'OCDE[5]-AEN[6] est reproduit en annexe.

Les dommages

En vertu de la Convention, l'exploitant est l'unique responsable (responsabilité exclusive) de tout dommage aux personnes et aux biens consécutif à un accident nucléaire survenu dans son installation. Par le principe de responsabilité objective, il n'est pas nécessaire pour les victimes de démontrer la faute de l'exploitant pour engager sa responsabilité.

Il existe cependant quelques cas particuliers où l'exploitant peut être déchargé de toute responsabilité (art. 9) :

- En cas d'accident nucléaire provoqué directement par « des actes de conflit armé, d'hostilités, de guerre civile ou d'insurrection » ;
- En cas de « cataclysme naturel de caractère exceptionnel ». Notons que la Convention n'apporte pas plus de détails sur le sens exact de ce terme. Ainsi, sans d'autre précision, cette notion peut être sujette à interprétation et devenir source de conflit en cas de catastrophe naturelle.

Toutefois, l'article 9 précise qu'une Partie Contractante peut prévoir dans sa législation une disposition contraire afin que la responsabilité de l'exploitant soit engagée pour les causes citées ci-dessus (cas de l'Autriche et de l'Allemagne).

Dans le cas où le dommage entraîne la responsabilité de plusieurs exploitants, l'article 5 (d) prévoit que leur responsabilité est « solidaire » et « cumulative », sans remettre en jeu les montants fixés par la Convention (15 M de DTS[7] soit environ 19,7 M€) pour chaque exploitant.

Précisions que, pour entrer dans le champ d'application de la Convention, l'accident nucléaire doit se produire sur le territoire d'une Partie Contractante. De plus, l'indemnisation des dommages subis sur les territoires d'États non-Contractants ne sont pas couverts pas la Convention.

Les montants

Le montant maximum à la charge de l'exploitant, suite à un accident nucléaire survenu dans son installation est fixé à 15 millions de DTS (≈ 19,7 M€).

Néanmoins, une Partie Contractante est libre de fixer un montant plus ou moins élevé.

Dans le cas particulier d'un accident nucléaire survenu dans une installation dite à faible risque ou au cours d'un transport, une Partie Contractante peut prévoir un montant moins élevé que celui mentionné au paragraphe précédent, à condition qu'il soit au minimum de 5 millions de DTS (≈ 6,2 M€).

5. Organisation de coopération et de développement.
6. Agence pour l'énergie nucléaire.
7. Les droits de tirages spéciaux sont un instrument monétaire créé par le FMI. Au 25/08/2016 1 EUR = 0,80 DTS.

Les délais de prescription

Toute demande de réparation doit être intentée dans un délai de dix ans à compter du jour où l'accident nucléaire s'est produit (aussi bien pour les dommages corporels que pour les dommages aux biens). Au-delà de cette période et sauf cas particulier, l'exploitant n'est plus considéré comme responsable, ainsi plus aucune action en réparation ne peut être intentée. Cependant, Une Partie Contractante peut fixer dans sa législation un délai plus long, en contrepartie de mesures prévoyant la couverture financière de l'exploitant après 10 ans. De plus, tant qu'un jugement définitif n'a pas été prononcé par le tribunal compétent, une personne ayant intentée une action en réparation dans le délai prévu par la Convention peut effectuer une demande complémentaire en cas d'aggravation du dommage, même après l'expiration de ce délai.

1.2 Convention complémentaire de Bruxelles

La Convention complémentaire de Bruxelles[8] actuellement en vigueur est celle telle qu'amendée successivement en 1964 et 1982. Aussi, le statut des ratifications étant exactement le même que pour la Convention de Paris, la figure 1 référence la situation des signataires de la CCB, pays par pays. À l'instar de la Convention de Paris, le Protocole de 2004 portant modification à celle-ci n'est toujours pas entrée en vigueur.

Son principal objectif est d'augmenter les montants alloués à l'indemnisation des victimes, tout en protégeant l'exploitant d'un montant de responsabilité plus lourd que celui fixé par la Convention de Paris. Ainsi, au-delà du montant à la charge de l'exploitant, la CCB fixe et limite (art. 3) l'indemnisation des victimes à travers deux tranches supplémentaires de la façon suivante :

- Première tranche d'indemnisation (Exploitant) : la législation de la Partie Contractante fixe le montant de responsabilité de l'exploitant à concurrence d'un montant au moins égal à 5M de DTS, conformément à la Convention de Paris ;
- Deuxième tranche d'indemnisation (État) : entre ce montant et 175 M de DTS, la charge revient à l'État où se situe l'installation nucléaire de l'exploitant responsable ;
- Troisième tranche d'indemnisation (les États de la CCB) : entre 175 et 300 M de DTS à la charge des Parties Contractantes selon une clef de répartition[9] stipulée à l'article 12. La répartition des 125 M de DTS restant à charge des Parties Contractantes est calculée selon deux indicateurs :
  - le PNB[10] : pour chaque Partie Contractante, 50% de leur contribution est déterminée par le rapport entre leur PNB et le total des PNB de toutes les Parties Contractantes,
  - la puissance thermique des réacteurs installés sur le territoire de chaque Partie Contractante : pour chaque Partie Contractante, 50% de leur contribution est déterminée par le rapport entre leur puissance thermique et le total de la puissance thermique de toutes les Parties Contractantes.

8. Parfois désignée CCB dans la suite.
9. Le lecteur intéressé par plus de précision sur la clé de répartition est invité à consulter l'annexe B reproduisant l'article 12 de la CCB.
10. Produit national brut.

1.3 Protocoles du 12 février 2004 modifiant la Convention de Paris et la Convention Complémentaire de Bruxelles

Le dramatique accident de la centrale nucléaire de Tchernobyl (1986) a permis de mettre en évidence l'insuffisance des dispositions prises par la CPB [11], notamment sur les montants alloués à l'indemnisation des victimes, et le délai de prescription. Là où le retour d'expérience de Tchernobyl a montré que les montants d'une telle catastrophe pouvaient s'élever à des centaines de milliards d'euros sur 30 ans, les 300 millions d'euros de réparation et le délai de prescription de 10 ans prévus par la CPB paraissent dérisoires. Devant ce constat, une refonte du régime de responsabilité civile de la CPB s'imposait.

C'est en ce sens que, les Protocoles de 2004 portant modification à la Convention de Paris et à la Convention complémentaire de Bruxelles ont été adoptés. Ceux-ci venant améliorer ces deux Conventions sur plusieurs points-clés.

Modification de la Convention de Paris

Les dommages

La signification du terme « dommage nucléaire » de l'article 1 est largement étendue. Désormais, les dommages immatériels, ainsi que les coûts engendrés par les mesures de sauvegarde et de restauration de l'environnement sont indemnisables en cas d'accident nucléaire.

Cette volonté d'élargir la notion de « dommage nucléaire » est également reprise dans le remplacement de l'article 3. En effet, d'après celui-ci l'exploitant n'est plus seulement responsable des dommages corporels et aux biens, mais de tout dommage, à l'exclusion de ceux causés à l'installation nucléaire et aux biens ayant un rapport avec l'installation.

Les montants

Le montant maximum de la responsabilité de l'exploitant de 15 Millions de DTS (≈ 19,7 M€) est remplacé par un montant minimum de responsabilité de 700 millions d'euros. En effet, il clairement stipulé dans le nouvel article 7 (a) du Protocole d'amendement que :

« toute Partie Contractante doit prévoir dans sa législation que la responsabilité de l'exploitant pour les dommages nucléaires causés par chaque accident nucléaire n'est pas inférieur à 700 M€ ».

De plus, les montants minimums en cas d'accident dans une installation à risque réduit et au cours de transport passent respectivement à 70 et 80 millions d'euros.

Les délais de prescription

Concernant les dommages corporels, le délai de prescription est porté à 30 ans. Le délai pour les dommages aux biens reste lui inchangé (10 ans).

11. Désigne l'ensemble formé par la Convention de Paris et la Convention Complémentaire de Bruxelles.

La portée géographique

La zone géographique sur laquelle des actions en réparation peuvent être intentées a aussi été étendue (art. 2). Ainsi, les dommages nucléaires subis sur des territoires et des zones maritimes d'États non-Contractants entrent potentiellement dans le champ d'application de la Convention. Cette modification a pour principal intérêt de faciliter les interactions entre d'une part, les pays parties à la Convention de Paris et au Protocole Commun, et d'autre part, les pays parties à la Convention de Vienne et au Protocole Commun [12]. Par ailleurs, tout autre État disposant d'un régime de responsabilité civile nucléaire semblable à la Convention de Paris est couvert par celle-ci. En outre, si un État dépourvu d'installation nucléaire subit des dommages sur son territoire ou dans sa zone maritime, alors il entre également dans le champ d'application de la Convention.

Les clauses d'exclusion

La clause excluant la responsabilité de l'exploitant en cas d'accidents consécutifs à des « cataclysmes naturels de caractère exceptionnel » a été supprimée. En revanche, l'exclusion est maintenue pour les « actes de conflit armé, d'hostilités, de guerre civile ou d'insurrection ».

Modification de la Convention complémentaire de Bruxelles :

Les modifications apportées par le Protocole d'amendement se situent essentiellement dans la révision des tranches d'indemnisations supérieures. En cas d'accident nucléaire :

- Le montant à allouer par l'État où l'accident a eu lieu passe de 175 M de DTS (≈ 219 M€) maximum à 500 millions d'euros maximum ;
- Le montant à répartir entre toutes les Parties Contractantes passe de 125 M de DTS (≈ 156 M€) maximum à 300 millions d'euros maximum. La clef de répartition [13] a été modifiée afin d'accentuer la participation des pays ayant un parc nucléaire développé, et donc une puissance thermique installée plus élevée. Le rapport basé sur la puissance thermique représente ainsi 65% et celui basé sur le PIB 35%.

1.4 Conséquences du Protocole sur le plan de l'assurance

Ces nouvelles mesures ont un impact direct sur l'exposition au risque des assureurs. En obligeant l'exploitant à se couvrir à hauteur de 700 millions d'euros, les assureurs doivent augmenter leurs capacités en conséquence. D'autre part, l'augmentation du délai de prescription de 10 à 30 ans pour les dommages corporels engendre un nouveau défi pour les assureurs, celui du provisionnement.

La répercussion de la suppression de l'exonération de la responsabilité de l'exploitant en cas de cataclysme naturel est elle aussi capitale. En effet, celle-ci vient augmenter la probabilité qu'un accident nucléaire au sens de la Convention se produise, et donc que l'assureur ait à assumer les montants prévus de couverture de l'exploitant. De plus, en cas d'événement naturel provoquant un accident nucléaire, l'assureur pourrait non

12. Le Protocole Commun a pour but de faciliter les interactions entre la Convention de Paris et la Convention de Vienne mais ne sera abordé ici.
13. Pour plus de détails sur la clef de répartition, voir 1.2.

seulement avoir à dédommager les polices touchées directement par l'événement, mais aussi les victimes de l'accident au titre de la convention, entraînant ainsi un risque de cumul potentiellement dangereux. Il convient donc pour les assureurs concernés de mesurer leurs expositions face à ce cumul.

Précisons, que se sont ces deux dernières modifications qui ont fait naître la volonté de mieux cerner le risque d'accident nucléaire en cas de tremblement de terre au sein du groupe AXA, entraînant ainsi l'élaboration de ce mémoire.

De son côté, l'extension de la zone géographique, ainsi que l'élargissement de la notion de « dommage nucléaire » aux coûts des mesures de sauvegarde et de restauration augmenteront nécessairement les sommes à indemniser. Ainsi, il y a de forte chance pour que le montant de 700 millions d'euros soit atteint, en cas d'accident majeur. À titre d'exemple, le coût de construction (toujours en cours) de l'enceinte de confinement du réacteur 4 à Tchernobyl est évalué à 1,5 milliard d'euros à lui seul selon un dossier de presse du constructeur VINCI [14].

2 Convention de Vienne

La Convention de Vienne de 1963 relative à la responsabilité civile en matière de dommages nucléaires (ci-après dénommée Convention de Vienne), et son Protocole d'amendement de 1997 s'inspirent largement des fondements de la Convention de Paris. Aussi y retrouve t-on, le principe de responsabilité objective de l'exploitant (art. 4), ou encore des définitions similaires à l'article 1 pour les termes « dommage nucléaire », « installation nucléaire » et « accident nucléaire ».

À la différence de la Convention de Paris instaurant un régime de responsabilité essentiellement concentré en Europe occidentale, celle-ci se veut plus large en s'étendant aux quatre coins du monde, même si, la plupart des Parties Contractantes se situent en Europe de l'est. À ce jour, la Convention de Vienne est entrée en vigueur dans quarante pays, la liste complète du statut des ratifications est illustrée par la figure 2 ci-dessous.

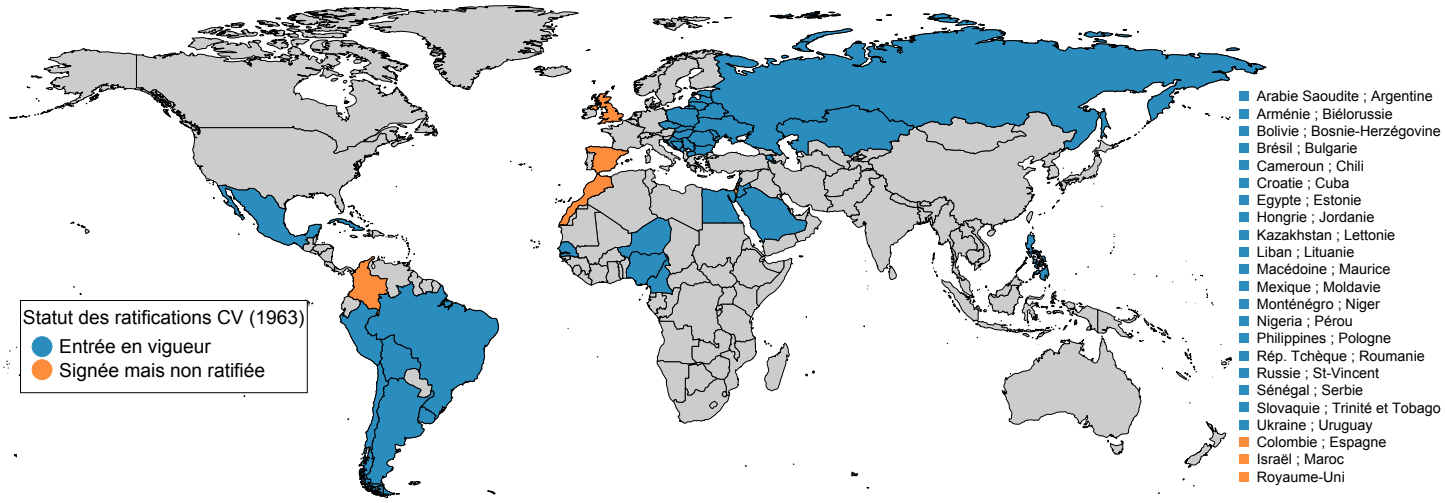


Fig. 2 - Carte du statut des ratifications (CV 1963) d'après l'OCDE au 27/01/2014.

14. Source : Dossier de presse de Tchernobyl, p. 14.

En plus d'être tardivement entrée en vigueur (1977), et ce malgré le peu de ratifications [15] nécessaires, la Convention de Vienne (en dépit de la catastrophe de Tchernobyl) n'a pas évoluée aussi rapidement que la Convention de Paris. En effet, il aura fallu attendre le Protocole d'amendement de 1997 avant que celle-ci soit révisée. Pourtant, dès son entrée en vigueur certaines dispositions paraissaient déjà obsolètes. Par exemple, et contrairement à la CPB, celle-ci ne prévoyait aucune indemnisation des victimes au-delà du "faible" montant (5 M$) prévu pour couvrir la responsabilité de l'exploitant. Ce long délai, avant la modernisation de la Convention de Vienne, peut s'expliquer par le fait que de nombreuses Parties Contractantes à la Convention de Vienne étaient à l'époque dépourvues d'installation nucléaire, contrairement aux Parties Contractantes à la Convention de Paris.

Comme il est souligné dans LAMM [1998], à la suite de de la signature du Protocole Commun en 1988, il était nécessaire de réviser [16] en profondeur la Convention de Vienne afin de faciliter les liens entre celle-ci et la Convention de Paris, en renforçant son régime de responsabilité civile sur plusieurs points importants.

2.1 Synthèse des évolutions apportées par le Protocole d'amendement de 1997

Comme nous venons de l'évoquer dans la section 2 ci-dessus, la Convention de Vienne avant d'être amendée en 1997 était perfectible. Nous proposons ici au lecteur, de passer en revue point par point les améliorations apportées par le Protocole, tout en évoquant la situation avant son entrée en vigueur le 4 octobre 2003.

Les dommages

À l'instar de la Convention de Paris [17], la Convention de Vienne de 1963 est peu précise sur la notion de « dommage nucléaire », par exemple, son article 1 ne prévoit pas de dispositions concernant « les mesures de sauvegarde » ou encore « les mesures de restauration ». En revanche, elle se veut légèrement plus complète quant aux dommages aux tiers, en stipulant que le dommage nucléaire inclut, en plus de tout dommage aux personnes et aux biens, le décès et la perte de biens.

Cette notion de « dommage nucléaire » a été revue en profondeur lors de la révision de la Convention de Vienne. Ainsi, le « dommage nucléaire » au sens du Protocole d'amendement est proche de celui de la Convention de Paris modifiée par le Protocole de 2004. Par suite, on y retrouve les concepts de dommage immatériel, de mesure de restauration de l'environnement, ou encore de perte d'exploitation lorsque celle-ci a un rapport avec l'utilisation d'un environnement dégradé.

Cependant, comme pour le Protocole de 2004 de la Convention de Paris, ces nouveaux concepts sont soumis à l'appréciation du tribunal compétent, et peuvent être, le cas échéant, non indemnisés par l'application de la Convention.

15. L'article 23 de La Convention de Vienne prévoit que celle-ci entre en vigueur dès le dépôt du cinquième instrument de ratification.

16. Cette nécessité est exprimée dans la Résolution GC(XXXII)/RES/491 de la Conférence générale de l'Agence internationale de l'énergie atomique du 23 septembre 1988. C'est seulement l'année suivante que des travaux de révision ont été entrepris, avant d'aboutir au Protocole d'amendement de 1997.

17. Désigne ici la Convention de Paris en vigueur, c'est-à-dire, celle telle qu'amendée en 1964 et 1982.

La portée géographique

Aucun article de la Convention de Vienne de 1963 détermine le champ d'application de celle-ci. Comme il est mentionné dans LAMM [1998], étant donné qu'il s'agit d'une Convention internationale, il serait raisonnable de penser que les articles 26 [18] et 29 [19] de la Convention de Vienne sur le droit des traités de 1969 s'y applique, et donc que la Convention de Vienne couvre uniquement les territoires des différentes Parties Contractantes à celle-ci.

Afin d'éclaircir cette situation, le Protocole précise désormais le champ d'application de la Convention de Vienne, en passant d'un cadre très restreint (seulement les Parties Contractantes) au plus large possible (quel que soit le lieu). Ce changement brutal énoncé à l'article 3, paragraphe 1 du Protocole stipule que : « La présente convention est applicable aux dommages nucléaires, quel que soit le lieu où ils sont subis ». Théoriquement, une victime pourrait donc intenter une action contre l'exploitant, peu importe le lieu où elle se situe, tant qu'elle est effectivement concernée par le dommage nucléaire. Cependant, les paragraphes suivants montrent que États sont libres d'exclure dans leurs législations les dommages subis sur le territoire d'un État non contractant ou dans la zone maritime d'un État non contractant. À condition seulement que celui-ci dispose d'au moins une installation nucléaire, et qu'il ne puisse offrir une couverture réciproque en cas d'accident nucléaire sur son territoire.

Les montants

Le montant de responsabilité de l'exploitant de 5 millions de dollars (USD) minimum par accident nucléaire, est fixé [20] dans l'article 5 de la Convention de Vienne, et constitue la principale source de motivation de sa révision. Déjà faible par rapport aux dommages indemnisables et à la portée géographique de la Convention de Vienne de 1963, il deviendrait obsolète dans le nouveau champ d'application du protocole d'amendement. En effet, les dispositions prises par ce dernier augmenteraient considérablement le nombre de victimes à indemniser en cas d'accident nucléaire, de ce fait les 5 millions de dollars ne permettrait pas d'offrir pas une réparation adéquate.

Désormais, le montant fixé par le Protocole paraît plus adapté avec l'extension du champ d'application. Dorénavant, le montant garantie par la Convention de Vienne ne peut être inférieur à 300 Millions de DTS (375 M€) par accident nucléaire, deux cas sont néanmoins possible :

- Soit l'État où se situe l'installation nucléaire prévoit un montant de responsabilité de l'exploitant qui ne peut être inférieur à 300 Millions de DTS ;
- Soit l'État fixe un montant de responsabilité qui n'est pas inférieur à 150 Millions de DTS et alloue à concurrence de 300 Millions de DTS des fonds publics afin de réparer le dommage nucléaire.

Néanmoins, pour faciliter la transition, et pour laisser le temps aux exploitants de se

18. Art. 26 : « Tout traité en vigueur lie les parties et doit être exécuté par elles de bonne foi».
19. Art. 29 : « À moins qu'une intention différente ne ressorte du traité ou ne soit par ailleurs établie, le traité lie chacune des Parties à l'égard de l'ensemble de son territoire. ».
20. L'État sur lequel se trouve l'installation fixe en réalité le montant de responsabilité de l'exploitant, sans pour autant que celui-ci puisse être inférieur à 5 M$, conformément à l'article 5 de la Convention de Vienne.

munir d'une garantie financière adaptée, un montant provisoire de 100 Millions de DTS peut être fixé pour une période de 15 ans à partir de l'entrée en vigueur du Protocole. Par contre, si le montant de responsabilité de l'exploitant fixé est inférieur, alors des fonds publics doivent être alloués à concurrence de 100 M de DTS.

3 Réglementation en vigueur en France : une situation ambiguë

Même si la réglementation en matière de responsabilité civile nucléaire tend à s'internationaliser, la situation reste figée concernant l'entrée en vigueur du protocole d'amendement de la Convention de Paris de 2004. Pour palier ce retard, la France, au même titre que la Belgique et les Pays-bas, a d'ores et déjà transposé dans sa nouvelle loi sur la transition énergétique (code de l'environnement) les dispositions prévues par le protocole d'amendement de 2004.

En revanche, même si les mesures du Protocole ont été adoptées dans le droit français, celles-ci demeurent inapplicables. En effet, en se référant au site Légifrance [21], d'après l'article L-597-25 [22], les montants de responsabilité de l'exploitant prévus dans la loi française [23] restent ceux de la Convention de Paris de 1960, et ce, jusqu'à trois mois après l'entrée en vigueur du protocole de 2004. De plus, l'article L-597-46 stipule que les dispositions prévues [24] par la Convention de Paris de 1960 « deviennent caduques [...] à la date d'entrée en vigueur du protocole portant modification de la convention de Paris signé à Paris le 12 février 2004 ». Par conséquent, aujourd'hui le montant maximum de responsabilité de l'exploitant de 91,5 millions d'euros fixé par l'État en vertu de la Convention de Paris est toujours valable. De façon symétrique, la Convention Complémentaire de Bruxelles, révisée par le Protocole de 2004, ne peut également être appliquée dans le cas d'un accident nucléaire en France.

La figure ci-dessous rappelle les éléments principaux de la situation actuelle de la France :

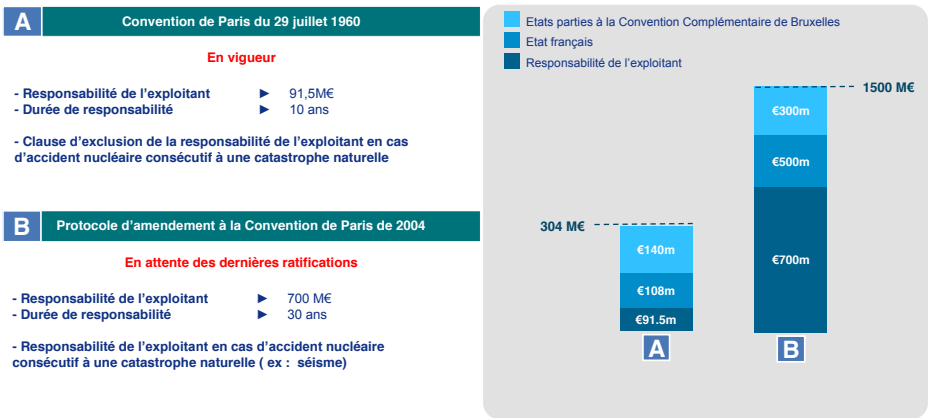


Fig. 3 - Schéma récapitulatif de la situation actuelle en France.

21. Site internet officiel du gouvernement français diffusant les textes législatifs et réglementaires.
22. Article figurant à la section 2 du chapitre VII du Titre IX du Livre V du code de l'environnement.
23. Pour plus de détail à ce sujet, les deux liens renvoyant vers les articles concernés sont donnés dans la bilbiographie.
24. Plus exactement, les dispositions prévues à la section 1 du chapitre VII du Titre IX du Livre V du code de l'environnement.

Cependant, malgré le fait que l'entrée en vigueur du Protocole de 2004 soit constamment repoussée, celui-ci devrait dans un avenir proche devenir la référence en matière de responsabilité civile nucléaire. Ainsi, l'assureur exposé au risque nucléaire a le devoir d'anticiper les conséquences des futurs modifications à venir.

Partie 2 : Organisation du marché de la réassurance face au risque nucléaire

La couverture d'une police Nucléaire diffère de ce que l'on peut habituellement rencontrer dans le milieu de l'assurance. Face à ce risque si particulier, les assureurs doivent mutualiser leurs efforts. Ainsi, dans cette section nous détaillerons la manière dont s'organisent ces acteurs (assureurs, réassureurs) pour mutualiser leurs capacités de couverture. Après avoir expliqué le placement d'une police Nucléaire en France et l'opération de *fronting* sous-jacente, nous étudierons l'organisation du modèle français Assuratome, enfin, nous évoquerons les mécanismes existants de part et d'autre le monde.

1 Placement d'une police Nucléaire et opération de *fronting*

En France, contrairement à une police classique (automobile, multirisques habitation, ...) où l'assureur supporte directement le risque de l'assuré, une police Nucléaire fait intervenir trois acteurs : l'assuré (exploitant d'une centrale nucléaire), l'assureur et le pool de coréassurance Assuratome. Dans ce mécanisme tripartite, l'assureur joue le rôle d'intermédiaire entre l'exploitant et Assuratome. En effet, l'assureur gère et négocie la souscription de la police auprès de l'exploitant, avant de rétrocéder le risque à Assuratome par une opération dite de *fronting*.

En règle générale, le *fronting* est une opération au cours de laquelle un assureur (le fronteur) rétrocède à une contrepartie, classiquement à un réassureur, tout ou partie d'un programme d'assurance. Le fronteur joue donc le rôle de pivot entre l'assuré et le réassureur. Par ce mécanisme, ce dernier supporte ainsi l'intégralité des sinistres du risque cédé en échange de l'ensemble des primes d'assurance correspondante. Quant à l'assureur, celui-ci s'enrichit par le biais d'une commission (souvent un certain pourcentage de la prime) versée par le réassureur.

Cette pratique est couramment utilisée par les grands groupes industriels pour contourner l'agrément d'assureur indispensable à l'émission d'un contrat d'assurance. Ces industriels (les assurés), à l'aide d'un ou plusieurs assureurs fronteurs, établissent des opérations de *fronting* plus ou moins élaborées pour transférer le risque de la société vers une captive de réassurance, elle même détenue par la maison mère du groupe. D'un point de vue juridique, cette opération est tout à fait licite puisque l'assureur reste officiellement en charge de la couverture du groupe, on parle alors d'assureur légal. La maison mère supportant son propre risque à travers sa captive de réassurance est désignée comme l'assureur de fait.

Le schéma ci-dessous illustrant l'opération de *fronting* offre une synthèse du mécanisme :

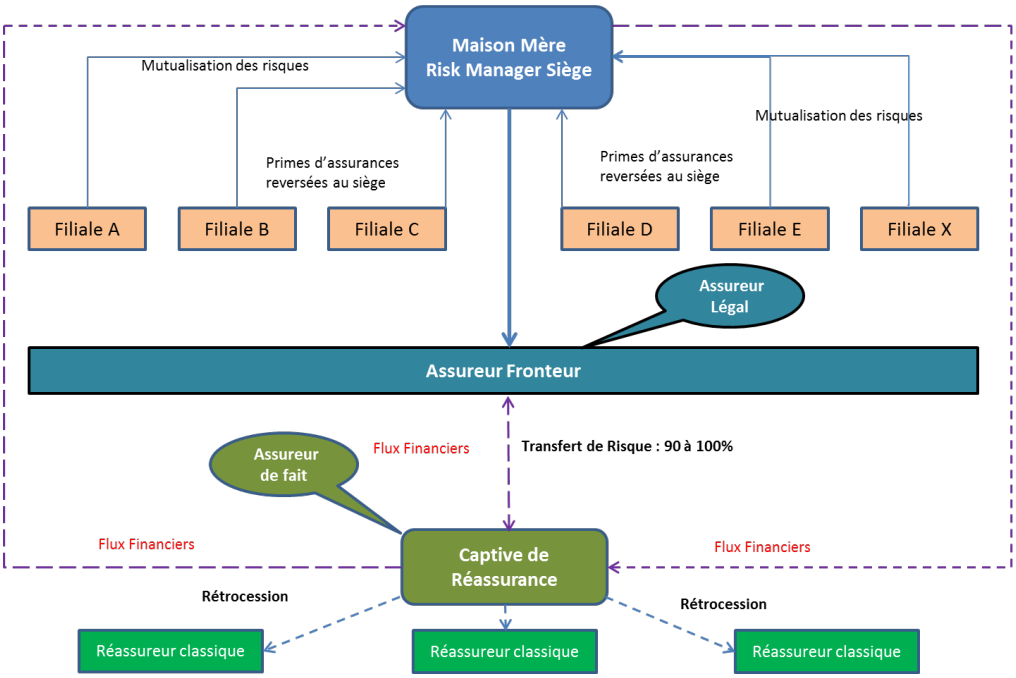


Fig. 4 - Schéma du mécanisme de *fronting*. Source : www.insurancespeaker-wavestone.com.

L'opération de *fronting* offre plusieurs avantages aux sociétés. D'un point de vue de la gestion des risques, ce mécanisme permet à une compagnie de se couvrir contre un grand risque que l'assureur ne serait pas prêt à assumer, ou bien, qu'il serait prêt à prendre en charge, mais contre une prime d'assurance trop élevée. En outre, les captives de réassurance étant souvent situées dans des paradis fiscaux, le mécanisme de *fronting* permet aux sociétés des montages d'optimisation fiscale. D'une manière générale, le refus de prendre en charge le risque de la part de l'assureur, ou, le coût prohibitif de la prime d'assurance pousse les grands groupes industriels à recourir au *fronting*.

Par exemple, en ce qui concerne l'industrie nucléaire, les acteurs majeurs tels qu'AREVA ou EDF utilisent cette stratégie de couverture alternative qu'est la captive d'assurance. Le but étant de pouvoir faire face à une partie de leurs responsabilités en cas d'accident nucléaire. Signalons, que rien n'interdit ce principe d'auto-assurance dans la Convention de Paris. En effet, celle-ci est assez souple en matière d'obligation de couverture de l'exploitant et autorise ce dernier à se couvrir par une quelconque garantie financière.

Dans le cas du placement d'une police Nucléaire, AXA fronte à 100%, c'est-à-dire qu'il cède intégralement le risque nucléaire auprès du pool de coréassurance Assuratome, aussi bien pour la garantie dommage que pour la garantie responsabilité civile. À noter que le *fronting* s'opère de manière distincte entre les garanties. le schéma ci-dessous illustre le mécanisme de placement d'une police Nucléaire par une opération de *fronting*.

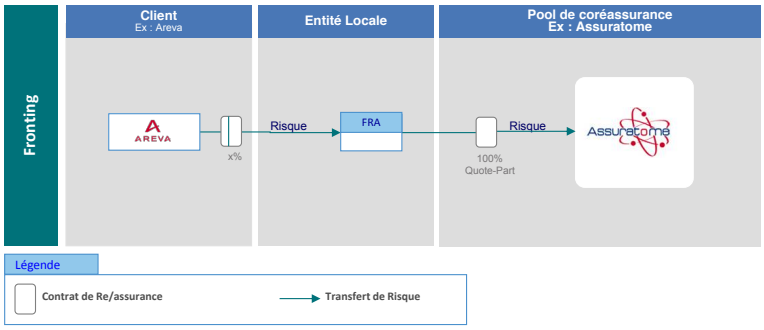


Fig. 5 - Schéma du mécanisme de *fronting* dans le cadre du placement d'une police Nucléaire.

2 Le modèle français : Assuratome

Le pool de coréassurance Assuratome est un Groupement d'Intérêt Économique (GIE) fondé en 1957 et spécialiste de l'Assurance du Nucléaire Civil. Son existence se justifie notamment par l'intensité potentielle du risque nucléaire et la spécificité du droit en la matière (cf. Convention de Paris). De par ce mécanisme de coréassurance, Assuratome permet à ses adhérents de mutualiser leurs efforts en joignant leurs capacités de couverture en dommage, en responsabilité civile et en assurance de personne (cette dernière branche est très minoritaire). Au 16 juin 2016, le Pool est composé de 34 membres [25], assureurs, réassureurs ou mutuelles [26] du marché français. le tableau ci-dessous montre la capacité totale d'Assuratome par branche pour l'année 2016.

Affaires directes (€)			Acceptations (€)		
RC	DM	AP	RC	DM	AP
245 567 000	383 785 000	7 229 599	94 742 000	151 815 000	4 836 836
Total : 636 581 599			Total : 251 393 836		
Capacité totale 2016 : 887 975 435					

Tab. 1 - Capacité d'Assuratome par branche au 1er janvier 2016 (34 membres). DM : Dommage ; AP : Assurance de personne. L'acceptation désigne la capacité liée aux risques acceptés en Quote-Part des autres Pools du nucléaire étrangers.

Les trois membres principaux, que sont le groupe AXA, le groupe Allianz et la SCOR Global P&C représentent à eux seuls environ 57% des parts du Pool. Ces parts sont calculées garantie par garantie comme le rapport de la capacité amenée par le fronteur sur la capacité totale du Pool. Précisons que le statut juridique d'Assuratome ne lui confère pas le droit d'émettre des contrats d'assurance directement auprès des exploitants nucléaires, d'où le recours au mécanisme de *fronting* par l'intermédiaire de ses membres.

Pour couvrir les exploitants nucléaires du territoire français, Assuratome s'occupe intégralement des polices dommage, responsabilité civile et assurance de personne pour compte commun de ses membres. C'est-à-dire qu'il supervise la gestion et le règlement

25. La liste des membres d'Assuratome au 16 juin 2016 est disponible sur ce lien.
26. Nous entendons ici par mutuelle, les mutuelles "classiques" du monde de l'assurance, les mutuelles spécialistes du risque nucléaire présentées dans la suite ne sont pas membres d'Assuratome.

des sinistres pour ses adhérents. Ainsi, en cas de sinistre le Pool assume entièrement l'indemnisation des victimes sans que les adhérents aient à intervenir, sauf dans le cas où ils n'ont pas transféré le risque à 100% lors de l'opération de *fronting* auprès d'Assuratome. Auquel cas ces derniers sont responsables de leur propre rétention. Par ailleurs, les membres d'Assuratome sont impactés chaque année par le résultat du Pool. Si celui-ci est positif, les adhérents sont rémunérés en fonction de leur part, et inversement, s'il est négatif les membres doivent réinjecter un montant proportionnel à leur part dans le Pool pour rééquilibrer le résultat.

Bien que le mécanisme du Pool permette une mutualisation des risques nucléaires, il rend également ses adhérents juridiquement solidaires entre eux. En effet, en cas de défaut de paiement de l'un des membres, une clause de solidarité prévoit que les autres parties prennent en charge l'indemnisation, et ce, en fonction de leur part dans le Pool. En outre, Assuratome se réassure en quote-part, affaire par affaire et, symétriquement, accepte des risques d'autres Pools nucléaires étrangers. Cela rend le risque nucléaire certes diversifié mais assez systémique au niveau mondial. De fait, l'assureur fronteur, en tant que membre du Pool s'expose à un risque de contrepartie, d'une part, avec les autres membres d'Assuratome, et d'autre part, avec les pools acceptant du risque en Quote-Part provenant d'Assuratome. Quantifier ce risque de contrepartie peut donc être une tâche difficile pour l'assureur. Par exemple, un groupe d'assurance d'envergure internationale tel qu'AXA, à travers ces différentes entités, est membre de plusieurs Pools nucléaires. De plus, une même entité peut également être membre de plusieurs Pools. Par conséquent, étant donné le nombre de d'intervenants mit enjeu et le mécanisme complexe de rétrocession entre les Pools, l'estimation du risque de contrepartie au niveau d'un groupe peut s'avérer délicate. Ajoutons à cela, que les Pools ne communiquent pas nécessairement de manière exhaustive à un membre donné sur les autres adhérents ni sur les mécanismes de rétrocession en place vers les autres Pools, rendant ainsi l'information difficile à centraliser au niveau d'un groupe.

La figure ci-dessous illustre le fonctionnement d'Assuratome et met en évidence le mécanisme complexe du transfert de risque nucléaire.

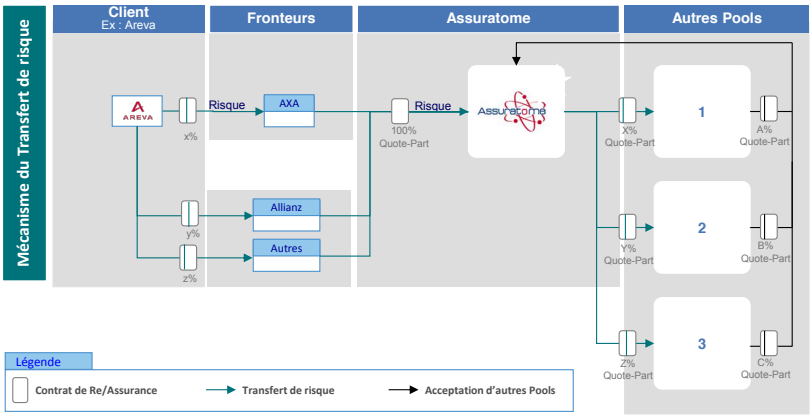


Fig. 6 - Schéma du fonctionnement du Pool Assuratome.

2.1 Les autres acteurs du marché français

Même si Assuratome demeure l'acteur principal sur le marché du risque nucléaire français, il n'est pas le seul apporteur de capacité. Il est en effet principalement concurrencé

par deux mutuelles européennes spécialisées dans le risque nucléaire et intervenant sur le marché français (les montants de capacité donnés ci-dessous sont extraits du bilan annuel 2015 de chacune des sociétés) :

- ELINI [27] pour la garantie RC nucléaire avec environ 76 M€ de capacité ;
- EMANI [28] société jumelle d'ELINI disposait d'environ 600 M€ de capacité pour le dommage aux biens.

Ces deux mutuelles ont également uni leurs forces en créant deux sociétés de réassurance du risque nucléaire :

- Blue Re pour la partie RC nucléaire uniquement avec une capacité de 14,8 M€ ;
- NIRA [29] pour le dommage et la RC nucléaire avec une capacité totale de 65 M€.

En matière de couverture RC, AREVA et EDF comptent parmi les clients les plus importants d'ELINI. Notons qu'ELINI se réassure auprès de la société Océane Ré, elle-même détenue par EDF, Océane Ré est donc une captive d'EDF. Nous retrouvons ainsi un exemple [30] concret de *fronting*.

3 Autres modèles notables

3.1 Modèle Américain : Le Price-Anderson Act

Au départ du même esprit que la Convention de Paris de 1960, le Price-Anderson Act est une loi américaine de 1957 obligeant tout exploitant d'une centrale nucléaire à maintenir une garantie financière en cas d'accident majeur. Aussi, pour ne pas freiner le développement de cette industrie naissante, l'engagement de l'exploitant est limité. Après diverses évolutions instituées par le congrès américain, ce fond atteignait un montant de 13,6 Mrd$ [31] de capacité en 2014, soit un montant bien plus élevé que celui à la charge de l'exploitant prévu par la Convention de Paris, même amendée par le protocole de 2004 (700 M€).

Cette capacité de 13,6 Mrd$ se décompose en deux parties distinctes :

- Première tranche : elle prévoit que les exploitants s'assurent pour chaque réacteur au montant maximum disponible sur le marché de l'assurance. Ce montant s'élevait en 2014 à 375 M$ par réacteur contre une prime de 860 000 $. À l'instar du système français les assureurs américains s'organisent également sous forme de Pool ;
- Deuxième tranche : en cas d'accident nucléaire consommant entièrement la capacité de la première, le Price-Anderson Act prévoit que les exploitants financent directement sous forme de prime l'excédent jusqu'à 121,3 M$ par réacteur installé. Soit un montant total de 13,2 Mrd$ réparti entre 104 réacteurs en 2014.

27. European Liability Insurance for Nuclear Industry.
28. European Mutual Association for Nuclear Insurance.
29. Nuclear Industry Reinsurance Association.
30. D'ailleurs à ce propos, EDF fut soupçonné d'optimisation fiscal en 2014 par l'État français, lui-même actionnaire majoritaire d'EDF. Voir par exemple l'article du monde sur ce sujet.
31. Source :https://www.nei.org.

En cas d'accident nucléaire mettant enjeu une somme supérieure à la capacité de 13 Mrd$, les États américains et les gouvernements locaux peuvent réclamer auprès du Congrès des montants supplémentaires.

Bien que ce système paraisse efficace, il oblige néanmoins les exploitants à mettre en place un système de provisionnement efficient. En effet, en cas d'accident majeur, un exploitant disposant de plusieurs réacteurs peut rapidement se retrouver à payer une somme colossale au titre de la deuxième tranche. Nous pouvons donc légitimement nous demander si les exploitants américains sont réellement en capacité de débloquer de telles sommes. Dans les faits, même si la deuxième tranche d'indemnisation n'a encore jamais été activée, ce système a pu montré son efficacité lors du célèbre accident de Three Mile Island en 1979 en apportant une indemnisation à hauteur de 79 M$.

3.2 Modèle Belge : Le SYBAN

Le SYBAN [32] forme un Pool de coassurance à la différence d'Assuratome qui est un Pool de coréassurance. La principale différence entre ces deux Pools se situe au niveau de la souscription. En effet, contrairement à Assuratome le SYBAN souscrit directement le risque auprès du client. Les membres n'ont donc pas de lien direct avec l'assuré.

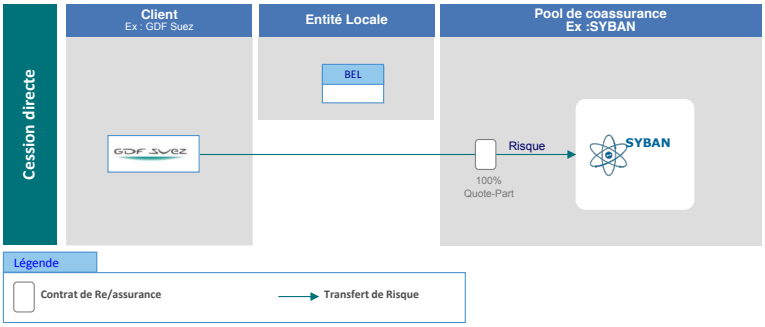


Fig. 7 - Schéma du mécanisme de souscription directe du SYBAN.

À l'instar d'Assuratome, le Pool s'occupe de la gestion et du règlement des sinistres pour compte commun de ses membres. De même les membres du Pool sont liés entre eux par une clause de solidarité. Au-delà de la rétention du Pool, le SYBAN place le surplus à l'extérieur auprès d'autres Pools étrangers et accepte du risque venant de ces derniers. À ce titre, Assuratome et le SYBAN se rétrocèdent mutuellement du risque. Notons que le SYBAN ne semble pas communiquer publiquement sur ses adhérents, ni sur les capacités allouées.

32. Syndicat Belge d'Assurances Nucléaires.

Partie 3 : Étude du risque sismique sur le site de Fessenheim : évaluation de l'aléa et quantification du risque pour l'assureur

1 Motivations et objectifs de l'étude

Au mois d'août dernier, un tremblement de terre de magnitude des moments[33] 6,2 selon l'USGS[34] frappe le centre de l'Italie. Ce séisme, dont l'épicentre est situé à environ 150 kilomètres au nord-est de Rome, a causé la mort d'environ 300 personnes et a engendré des dégâts matériels considérables. En détruisant presque entièrement le petit village d'Amatrice situé non loin de l'épicentre, cet évènement tragique vient nous rappeler que l'Europe de l'Ouest peut à tout moment être touchée par un violent séisme. Bien sûr, de par les normes parasismiques auxquelles sont soumises les centrales nucléaires, cette secousse n'aurait vraisemblablement pas détruit une centrale localisée à Amatrice, mais néanmoins, ceci conduit à réfléchir à la vulnérabilité de ce type d'infrastructure aux tremblements de terre.

Un autre élément, plus important peut-être, vient renforcer notre projet d'étude. Il s'agit d'une note[35] datant du 15/07/2016 publiée sur le site de l'ASN faisant état d'un incident de niveau 1 sur l'échelle INES[36]. Cet incident rapporté par EDF signale un « risque de défaillance d'éléments importants pour la protection en cas de séisme ». Malgré le fait que cet incident soit seulement de niveau 1, il soulève encore une fois le problème de la vulnérabilité des sites nucléaires aux séismes, et nous conforte dans notre projet de modélisation.

Le choix du site de Fessenheim, n'est pas dû au hasard. En effet, cette centrale nucléaire apparaît comme la plus vulnérable en France en cas de séisme et ce pour plusieurs raisons. Tout d'abord, comme nous le verrons dans la suite, celle-ci est située dans une région ayant déjà subie des événements sismiques notables dont un majeur : le séisme de Bâle (1356) de magnitude des moments 6,5. À cela, vient s'ajouter le fait qu'il s'agit de la plus vielle centrale nucléaire du parc français. Construite en 1978 à une époque où les normes parasismiques en vigueur étaient moins exigeantes, la centrale semble potentiellement moins résistante que d'autres plus modernes. Même si au regard de l'actualité récente, le site devrait fermer à un horizon assez proche, les éléments exposés précédemment justifient notre choix.

En outre, ce risque en général très peu connu par l'assureur peut éventuellement engendrer (au-delà des conséquences sanitaires) de lourdes pertes pour l'exploitant d'une centrale nucléaire et par conséquent, pour son assureur. En effet, comme nous l'avons souligné à la section 1.3, la responsabilité de l'exploitant en cas d'accident nucléaire consécutif à un « cataclysme de caractère exceptionnel » ne sera plus exclue du champ de la convention de Paris modifiée par le protocole de 2004. D'autre part, dans un contexte où les exigences quantitatives de la réglementation Solvabilité 2 encouragent l'assureur à toujours affiner sa connaissance du risque auquel il s'expose, la quantification d'un risque

33. La notion de magnitude des moments sera expliquée dans la section 2.1
34. United States Geological Survey.
35. Disponible sur le site de l'ASN : lien.
36. L'échelle INES comporte 8 niveaux classés de 0 à 7, celle-ci est reproduite à l'annexe C.

rare et extrême tel que le risque nucléaire prend tout sons sens.

Ainsi, le but recherché à travers notre modélisation est de proposer une méthode afin dévaluer ce type de risque si particulier qu'est l'accident nucléaire consécutif à un tremblement de terre. Nous essaierons d'estimer la probabilité que cet événement survienne, puis de construire un générateur de pertes brutes qui sera la base de futurs travaux sur l'élaboration de scénarios extrêmes de pertes nettes. Pour construire le générateur, nous nous appuierons sur l'historique et la documentation disponible pour constituer des classes de coûts probables en fonction de l'aléa sismique.

2 Éléments de base en sismologie

Avant de rentrer dans les détails de la modélisation, nous proposons au lecteur de passer en revue certains aspects de sismologie qui seront utilisés dans la suite.

2.1 Magnitude d'un séisme

La notion de magnitude a été introduite pour la première fois par Charles Francis Richter dans les années 30. Son idée était de pouvoir mesurer la force des séismes à partir de l'énergie qu'ils libèrent indépendamment de la distance entre le lieu d'observation et l'épicentre. Son idée était révolutionnaire pour l'époque, avant, l'unique mesure de la puissance d'un séisme était son intensité sur l'échelle de Mercalli. Évaluée à partir des dommages aux personnes et aux biens, la force d'un séisme est classée sur une échelle de I à XII. I représentant des séismes non perceptibles par l'homme et XII une déformation complète du paysage. Contrairement à la magnitude, celle-ci mesure uniquement les conséquences d'un séisme et non sa réelle puissance. De plus, les dégâts provoqués par un séisme dépendant fortement de sa localisation et du lieu d'observation, cette échelle ne reflète donc pas précisément la puissance d'un séisme. En s'intéressant directement à l'énergie libérée par un séisme, la magnitude se veut donc être une mesure plus objective. Par exemple, pour une magnitude donnée, un séisme ayant eu lieu proche d'une zone urbaine pourra engendrer d'importants dégâts et donc avoir une forte intensité, alors que le même séisme (de même magnitude) au milieu de l'océan aura une faible intensité.

En revanche, la magnitude telle que définie par Richter était fiable seulement pour les séismes proches des sismographes. Désormais, cette magnitude est appelée magnitude locale (M_l). Pour s'affranchir de cette limite, Gutenberg et Richter proposeront l'année suivante une nouvelle magnitude basée sur les ondes de surface notée M_s. Un autre type de magnitude noté M_b reposant cette fois sur les ondes de volume sera également proposé en 1956. Ces ondes dégagées lors d'un séisme se propageant différemment selon la direction de l'espace et s'atténuant avec la distance parcourue, les sismographes enregistrent des amplitudes différentes, d'où l'existence de plusieurs types de magnitudes. Voici les caractéristiques principales des ondes mesurées par les deux magnitudes citées :

La magnitude M_b mesure l'amplitude des ondes de volume se propageant à l'intérieur du globe :

- Les ondes P sont des ondes longitudinales compressant et dilatant successivement le milieu qu'elles rencontrent. Leurs vitesses maximales généralement comprises entre 3,5 km/h et 14 km/h selon la structure rencontrée en font les ondes les plus rapides émises lors d'un tremblement de terre. Elles sont en revanche, les ondes les moins destructrices, toutefois elles permettent d'alerter de la survenance d'un séisme ;

- Les ondes S, environ deux fois plus lente succèdent aux ondes P et vibrent de manière transversale perpendiculairement à leurs sens de propagations.

La magnitude M_s mesure l'amplitude des ondes de surface. Moins rapide que les ondes de volumes mais en général de plus forte amplitude :

- Les ondes L (ondes de Love) comparables aux ondes S sans le mouvement vertical déforment le sol dans un plan horizontal perpendiculairement à leurs direction de propagation. Ces ondes engendrent en général de nombreux dégâts au niveau des fondations, particulièrement sur les constructions non parasismiques. Ces ondes sont le résultat de l'interférence de la composante horizontale des ondes P et S ;
- Les ondes R (ondes de Rayleigh) oscillent de manière plus complexe. Le mouvement est elliptique (à la fois vertical et horizontal). Ces ondes sont le résultat de l'interférence de la composante verticale des ondes P et S.

La figure 8 ci-dessous illustre la pertubation du milieu en fonction du type d'onde :

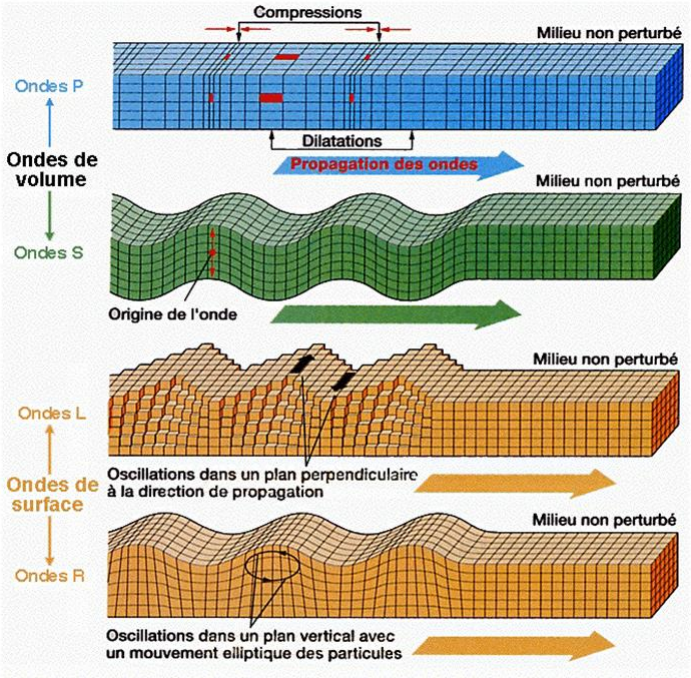


Fig. 8 - Déformation du millieu selon le type d'onde : source seismes-ondes.joueb.com.

Le problème principal de ces différentes magnitudes réside dans le fait qu'elles ne sont valides que pour un type de signal donné et ont tendance à devenir instable avec l'augmentation de la puissance du séisme. Pour pallier ce problème, la magnitude des moments (M_w) fut introduite en 1979 par Hanks et Kanamori [37].

La magnitude des moments est un nombre sans dimension tel que :

$$M_w = \frac{2}{3}\log_{10}(M_0) - 6,07$$

où M_0 représente le moment sismique exprimé en Newton-mètre et défini par :

37. Voir HANKS et KANAMORI [1979].

$$M_0 = \mu \times S \times \Delta_u$$

Avec

- μ : rigidité du milieu (en N/m^2) ;
- S : surface de la faille ayant rompue (en m^2) ;
- Δ_u : glissement ou déplacement moyen sur la faille (en m).

Le moment sismique défini par Aki en 1956 est une quantité physique directement liée à l'énergie totale libérée par un séisme. Ce moment est donc proportionnel à la surface rompue de la faille et au glissement moyen produit lors du séisme.

Cette magnitude en plus d'être plus stable pour les événements sévères a l'avantage d'être directement lié au moment sismique et donc aux propriétés de la faille.

2.2 Accélération maximale du sol

L'accélération maximale du sol communément notée *PGA* pour *Peak Ground Acceleration* désigne pour une localisation donnée la valeur maximale de l'accélération en surface durant un tremblement de terre. Généralement exprimée en m/s^2 ou en g, le *PGA* est une des mesures les plus utilisées en génie civil pour la conception d'ouvrages parasismiques. De manière générale, les mouvements du sol et donc le *PGA* augmentent avec la puissance d'un séisme.

En revanche, les ondes évoluant différemment selon le milieu dans lequel elles se propagent, des effets appelés « effets de sites » peuvent venir atténuer ou amplifier le phénomène d'accélération en fonction des propriétés du sol. Ce phénomène est parfaitement illustré par la figure 9 ci-dessous tiré du site de l'IRSN [38]. Sur celle-ci figure l'acccélération mesurée lors d'un séisme de magnitude 5 pour deux stations proches mais reposant sur des sols différents. En haut la station repose sur un sol dur (rocher) alors que la station du dessous se trouve sur des sédiments donc un sol meuble :

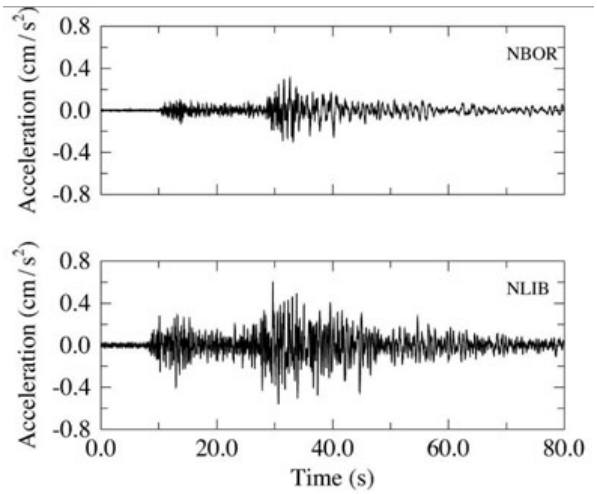


Fig. 9 - Accélération au sol mesurée par deux stations proches et reposant sur deux types de sols différents.

38. Graphique de l'IRSN disponible sur ce lien.

Des travaux menés par l'ABAG [39] et reliés par l'USGS ont permis d'établir une relation entre l'accélération au sol et les effets d'un séisme à la surface de la Terre via l'échelle de Mercalli modifiée. Pour chaque intensité de l'échelle correspond un intervalle d'accélération au sol :

Intensité	**PGA [g]**	**vélocité (cm/s)**	**Perception de la secousse**	**Dommage potentiel**
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	Léger	Aucun
V	0,039 - 0,092	3,4 - 8,1	Modéré	Très léger
VI	0,092 - 0,18	8,1 - 16	Forte	Léger
VII	0,18 - 0,34	16 - 31	Très forte	Modéré
VIII	0,34 - 0,65	31 - 60	Sévère	Modéré à lourd
IX	0,65 - 1,24	60 - 116	Violent	Lourd
X+	>1,24	>116	Extreme	Très lourd

Tab. 2 - Correspondance *PGA* échelle de Mercalli modifiée.

Par ailleurs, l'accélération au sol est souvent utilisée dans l'élaboration de carte d'aléa sismique. Ces cartes représentent en général la valeur ou l'intervalle de *PGA* pouvant être dépassé avec une probabilité de 10% sur 50 ans.

3 Mise en place de la méthodologie

3.1 Vue d'ensemble de la méthodologie de modélisation

L'approche actuarielle classique d'un modèle fréquence-coût, largement utilisée en assurance non-vie, constitue bien souvent une méthode efficace pour l'assureur afin de quantifier le risque généré par un portefeuille donné. À travers une modélisation par régression (couramment de type MLG [40]) et en présence d'information suffisante sur une période raisonnable (sinistralité, variables explicatives, ...), l'assureur peut aisément déterminer le risque auquel il s'expose.

Dans le cas particulier du risque d'accident nucléaire majeur, l'utilisation de cette méthode paraît difficilement envisageable, encore plus qu'il s'agit ici d'évaluer des événements très rares et même non observés à ce jour. À l'heure actuelle "seulement" quatre observations d'accidents nucléaires majeurs sont officiellement recensés : Kyshtym (Russie 1957), Three Mile Island (USA 1979), Tchernobyl (Ukraine 1986) et Fukushima (Japon 2011). De plus, parmi ces quatre catastrophes seulement celle de Fukushima est liée à un tremblement de terre, et qui plus, pas de manière directe. En effet, le séisme en soit n'a pas engendré l'accident, celui-ci résulte du tsunami généré par le tremblement de terre. Aussi, nous ne disposons donc d'aucun historique de sinistralité. Étant donné que le but *in fine* est d'estimer une probabilité d'occurrence et coût d'un séisme capable de générer une catastrophe nucléaire en France, nous avons dû réfléchir à une méthodologie plus adaptée à un tel risque.

39. Association of Bay Area Governments.
40. Modèles linéaires généralisés.

Pour mener à bien cette étude, nous nous sommes en grande partie appuyés sur les normes parasismiques françaises en vigueur pour les installations à haut-risque, dont les centrales nucléaires font bien évidemment partie. Ces précieuses informations disponibles sur le site internet de l'IRSN,[41] nous ont permis d'instaurer un cadre de modélisation en posant des hypothèses censées, tant sur le plan de la simulation des séismes, que sur la résistance théorique d'une centrale nucléaire française.

La méthodologie employée se composant d'une multitude de petits blocs, avant de détailler point par point toutes les étapes, nous proposons au lecteur une vue d'ensemble de celle-ci afin de fixer les idées et de mieux comprendre le cheminement proposé. La méthodologie utilisée peut se résumer en trois grandes phases. De manière très synthétique, celle-ci se décompose de la manière suivante :

- Mise en place de la méthodologie :
  - spécification des hypothèses du modèle à partir de la réglementation en vigueur (Norme RFS n-2001-01),
  - recherche d'un catalogue de sismicité adapté à notre problématique,
  - détermination d'une méthode permettant de mesurer l'impact à partir de l'accélération maximale du sol (PGA),
  - traitement de l'image de la carte des régions sismotectoniques.
- Préparation des entrées du modèle :
  - détermination du seuil de résistance théorique (ou valeur de conception) du site de Fessenheim par application de la réglementation,
  - modélisation de l'intensité et de la survenance d'un séisme par des lois statistiques.
- Module de simulation de séismes et mesure de l'impact sur le site de Fessenheim :
  - simulation de la survenance, de la localisation et de la magnitude à partir des lois calibrées lors de la première phase,
  - mesure de l'impact des séismes via l'accélération maximale du sol simulée sur la centrale et modélisation des événements extrêmes obtenus par une distribution de Pareto généralisée (GPD[42]),
  - analyse des résultats et création de classes de coûts potentiels,
  - calibration d'un générateur de pertes brutes.

Dans les sections qui suivent, nous détaillerons point par point toutes les étapes réalisées en amont. Dans un premier temps, Nous insisterons tout particulièrement sur le rôle clef de la réglementation dans notre modélisation. Enfin, après avoir expliqué comment nous avons choisi un catalogue de sismicité, nous présenterons la méthode retenue pour évaluer les dégâts pouvant être causés par un séisme sur le site de Fessenheim.

3.2 Analyse des normes parasismiques en vigueur

Avant de se concentrer sur la réglementation en vigueur et les hypothèses qui en découlent, arrêtons nous sur un point essentiel : la notion de région sismotectonique.

41. Explication de la réglementation parasismique pour les sites nucléaires français : Page de l'IRSN.
42. *Generalised Pareto distribution.*

Une région sismotectonique est une zone élaborée à partir du croisement de données géologiques, géophysiques et sismologiques. Elle représente une zone géographique ayant sa propre activité sismique. Par construction, une zone est considérée comme homogène, c'est-à-dire qu'un séisme ayant déjà eu lieu dans une zone donnée est susceptible de s'y reproduire en tout point et ce, de manière équiprobable. De plus, il est fait l'hypothèse que ces zones sont indépendantes les unes des autres. Ainsi, chaque zone possède sa propre activité sismique.

La figure 10 ci-dessous représente la carte des régions sismotectoniques [43] définies par l'IRSN en 2006. Comme nous allons le voir cette carte a un rôle central dans la calibration des seuils de résistance pour l'industrie nucléaire française.

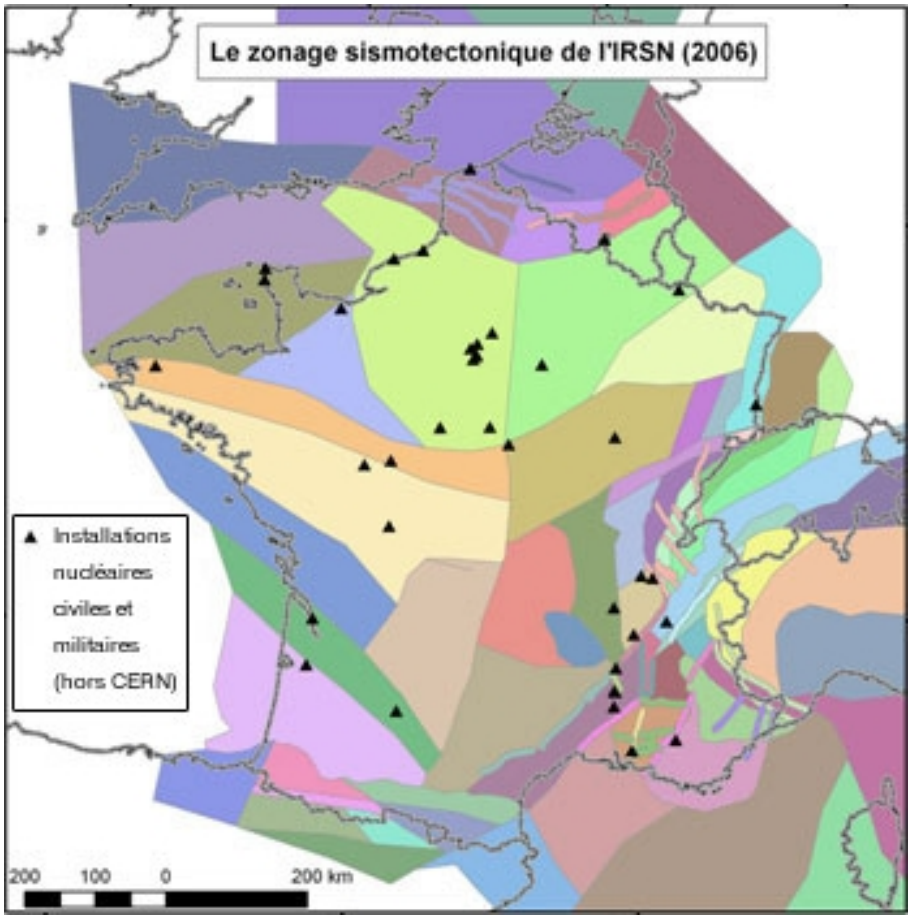


Fig. 10 - Carte du zonage sismotectonique de l'IRSN (2006).

Cependant, sa faible résolution rend son exploitation difficile. C'est pourquoi, nous utiliserons une carte simplifiée disponible sur Wikipedia mais d'une qualité nettement supérieure à l'originale. Celle-ci est présentée en figure 11 ci-dessous :

43. Carte du zonage sismotectonique de l'IRSN disponible sur ce lien.

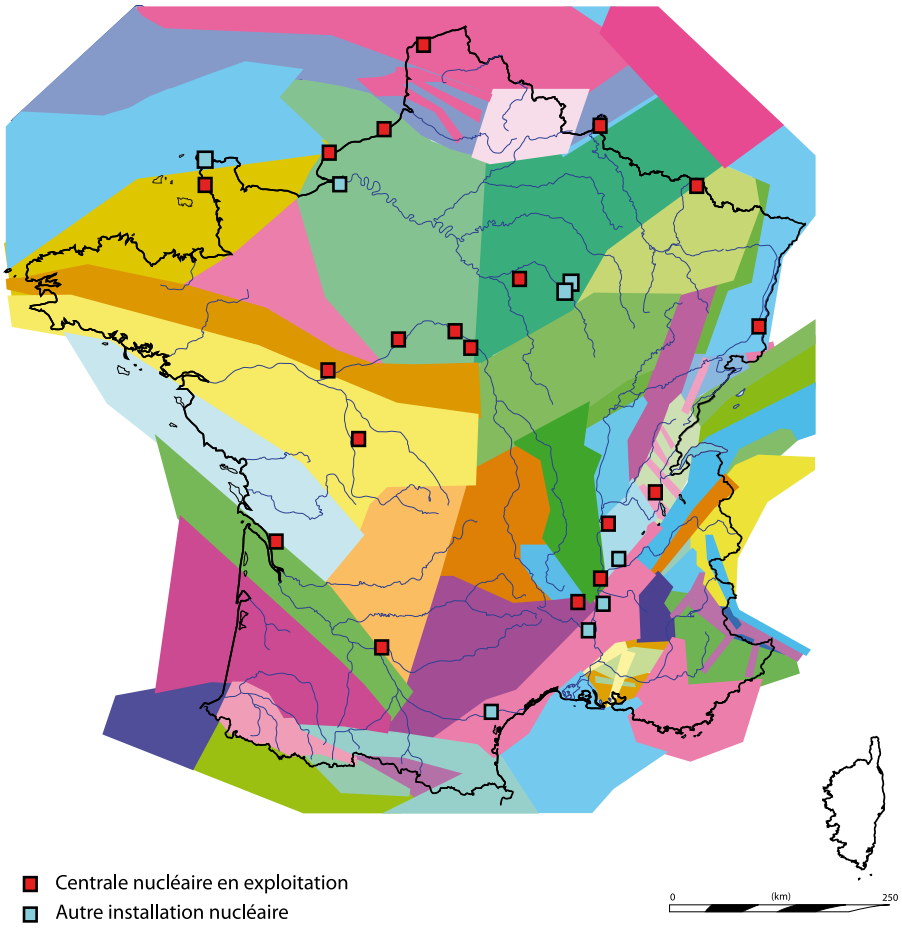


Fig. 11 - Carte simplifiée des régions sismotectoniques françaises.

Comme nous l'avons évoqué, c'est à partir de ce zonage sismotectonique que les normes parasismiques sont définies. La réglementation actuelle impose qu'une centrale soit conçue de sorte à résister aux séismes historiques susceptibles d'engendrer le plus de dégâts. Concrètement, cela revient à identifier les séismes de plus forte magnitude survenus dans la zone de la centrale et dans les zones adjacentes. Par mesure de sécurité, les séismes ainsi déterminés sont ensuite majorés de 0,5 points de magnitude des moments et translatés de manière virtuelle au plus proche de la centrale nucléaire. Deux cas de figures sont à distinguer :

- Si le séisme se trouve dans la zone de la centrale nucléaire, la translation revient à déplacer directement celui-ci sous la centrale ;
- Si le séisme est situé dans une zone adjacente, le séisme est déplacé au point de sa zone le plus proche de la centrale.

Le séisme ayant le plus fort impact sur la centrale nucléaire ainsi déplacé et majoré de 0,5 point servira de référence pour calibrer le seuil de résistance théorique de la centrale nucléaire.

La figure 12 ci-dessous tirée du site [44] de l'IRSN illustre le déplacement des séismes de leurs localisation historique vers la centrale de Paluel (Normandie). Les séismes de Breteuil et de Veules-les-Roses situés dans la zone du site nucléaire sont déplacés directement sous

44. Carte exemple des déplacements des séismes vers le site de Paluel disponible sur ce lien.

celui-ci, en revanche, le séisme de Caen lui est déplacé au plus près de la centrale tout en restant dans sa zone d'origine.

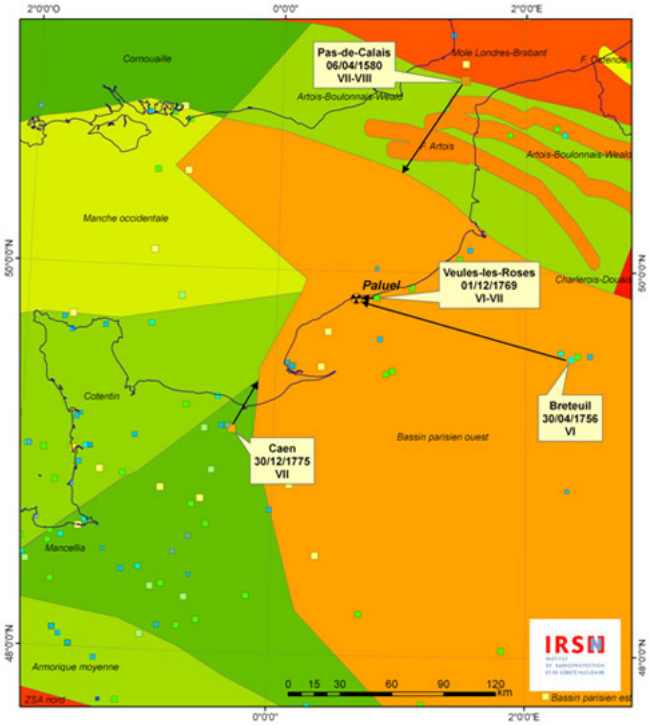


Fig. 12 - Exemple de déplacement des séismes vers le site de Paluel.

Cette partie réglementaire revêt une importance capitale pour notre modélisation. À partir de celle-ci et une fois la carte des régions sismotectoniques (figure 11) rendue exploitable, il sera possible de caractériser le séisme de référence théorique auquel le site de Fessenheim doit pouvoir faire face. Ce seuil nous servira de pivot pour construire des classes de coûts potentiels.

L'analyse des normes parasismiques en vigueur nous a finalement permis de dégager des hypothèses réalistes en accord avec la réglementation pour notre modélisation. En effet, comme les zones sont considérées comme étant indépendantes les unes des autres, nous pourrons ainsi considérer une loi d'intensité et d'occurrence d'un séisme pour chacune d'elles. De plus, comme nous venons de l'évoquer nous pourrons déterminer un seuil de résistance théorique à partir du séisme de référence.

3.3 Sélection d'un catalogue de sismicité approprié

De nombreux catalogues de sismicité sont disponibles en accès libre sur internet. Néanmoins, la majorité d'entre eux sont construits à l'échelle d'un pays et sur une période de temps restreinte. A titre d'exemple, le catalogue de « Sismicité Instrumentale de l'Hexagone» ne couvre que la période 1962-2009 et seulement pour la France. Si nous utilisions ce catalogue, la détermination du séisme de référence serait faussée. En effet, le séisme maximum pour une zone donnée peut avoir eu lieu avant cette période. C'est notamment le cas pour le site de Cadarache situé dans les Bouches-du-Rhône où un des séismes de référence a eu lieu à Lambesc en 1909. Pour notre modélisation, il est donc nécessaire de disposer du plus large historique possible afin d'être sûr de tenir compte du séisme de référence. En outre, le site de Fessenheim étant proche de la frontière allemande et suisse,

nous devions trouver un catalogue contenant ces pays en plus de la France.

En réponse à ces deux critères, notre choix s'est porté sur le catalogue européen SHARE [45] Version 3.3. Cette base de données regroupe et harmonise des dizaines de catalogues régionaux. En libre accès, la base répertorie les séismes de magnitude des moments supérieure ou égale à trois dans toute l'Europe entre l'an 1000 et 2006.

Fig. 13 - Illustration du séisme de Lisbonne de 1755 ($M_w \approx 9$) par João Giama Ströberle (1760).

À la fin du 19ème siècle le développement des stations sismiques a largement contribué à améliorer la précision avec laquelle la magnitude des séismes est mesurée. En revanche, avant cette période seuls les séismes ayant eu un impact majeur étaient répertoriés, soit sous forme d'écrit, soit sous forme de tableau (Voir Illustration figure 13). À partir de ces archives et d'une étude complémentaire des failles ayant générées des séismes importants, les sismologues ont pu fournir une estimation de leurs moments sismiques et donc de leurs magnitudes des moments, permettant ainsi de constituer une base remontant jusqu'à l'an 1000.

Cette base de données regroupant 29709 séismes répartis sur 44 pays contient pour chaque séisme les informations suivantes :

- L'année de survenance ;
- Le pays ;
- La localisation (longitude / latitude) ;
- La magnitude des moments (en M_w) ;
- La profondeur (en Km) ;
- Le type d'événement (événement principal ou réplique).

3.4 Quantification de l'impact d'un séisme

À partir du catalogue de sismicité, il sera désormais possible de simuler des magnitudes des moments. Néanmoins, la magnitude exprime l'énergie libérée par un séisme et ne permet pas d'évaluer les dégâts provoqués en surface. Pour évaluer l'aléa sismique et ses

45. Catalogue disponible ici : http://www.efehr.org:8080/jetspeed/portal/hazard.psml

possibles conséquences sur le site de Fessenheim, nous nous baserons sur l'estimation du *PGA* au niveau de la centrale.

Dans la littérature, de nombreux auteurs établissent des relations empiriques entre la magnitude et l'accélération maximale du sol dans différentes régions du monde. En se basant sur les caractéristiques des séismes historiques et les valeurs de l'accélération maximale du sol correspondantes (relevées par un réseau de stations accélérométriques), les sismologues procèdent par régression pour établir une relation linéaire. Malheureusement, malgré de longues recherches nous n'avons pas été en mesure de trouver des données en accès libre pour établir nous même cette relation autour du site de Fessenheim. À défaut, pour modéliser l'accélération maximale du sol nous nous sommes appuyé sur les travaux réalisés dans CORNELL *et al.* [1979], DOST *et al.* [2016] et GRÜNTHAL *et al.* [2009].

3.4.1 Modélisation déterministe de l'accélération maximale du sol

L'approche décrite par l'IRSN pour déterminer le séisme de référence auquel la centrale doit pouvoir résister est une méthode déterministe basée sur la sismicité historique. Afin de fixer les idées, nous rappelons brièvement les différentes étapes de la méthode :

1. Détermination du séisme historique de plus forte magnitude par zone (zone de la centrale et ses zones adjacentes) ;
2. Majoration de 0,5 point de magnitude des séismes ainsi déterminés ;
3. Translation des séismes majorés au plus proche de la centrale :
   - pour le séisme situé dans la zone de la centrale nucléaire, cela revient à le déplacer virtuellement sous la centrale nucléaire (ou valeur de conception),
   - pour les séismes situés dans les zones adjacentes, cela revient à les déplacer au point de leur zone étant le plus proche de la centrale.
4. Évaluation de l'impact en terme d'accélération maximale du sol des séismes translatés et majorés.

Après évaluation, le séisme générant l'accélération maximale la plus forte est retenu comme séisme de référence. Puis la valeur de l'accélération calculée détermine le seuil de résistance théorique de la centrale nucléaire. Constatons que malgré sa simplicité, cette méthode d'évaluation est conservatrice en majorant de 0,5 point de magnitude les séismes historiques de chaque zone. De plus, le déplacement virtuel des épicentres fournit un niveau de sûreté supplémentaire en rapprochant les séismes majorés au plus proche de la centrale. Cependant, bien que conservatrice, cette méthode est parfois décriée par certains spécialistes car celle-ci se limite à l'historique et ne prend pas en compte d'éventuels événements extrêmes non observés à ce jour. Malgré tout, celle-ci reste la méthode réglementaire en France.

À ce stade, nous avons donc besoin d'une équation pour générer le *PGA* au niveau de la centrale nucléaire de Fessenheim. Pour ce faire, nous avons utilisé l'équation déterminé dans CORNELL *et al.* [1979] et reprise dans DOUGLAS [2011]. Les auteurs donnent l'équation de *PGA* (cm/s^2) suivante :

$$\ln(PGA) = 6,74 + 0,859M_l - 1,8\ln(R + 25) + B \tag{1}$$

avec

- M_l la magnitude locale ;

- R la distance hypocentrale (en Km) ;
- B le bruit tel que $\mathcal{N}(0; 0,325)$.

La distance hypocentrale correspond à la longueur de l'hypoténuse du triangle rectangle formé par l'épicentre, l'hypocentre et la station de mesure d'enregistrement du séisme. L'hypocentre ou le foyer désigne le point de rupture sur la faille lors d'un séisme. L'épicentre est la représentation de l'hypocentre à la surface de la Terre. Pour une station de mesure donnée, nous avons donc la situation suivante :

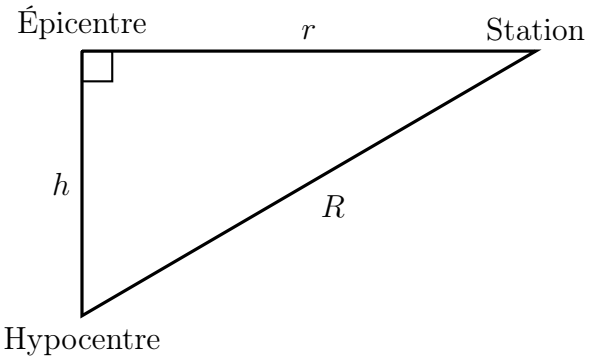


Fig. 14 - Schéma des distances épicentrale et hypocentrale.

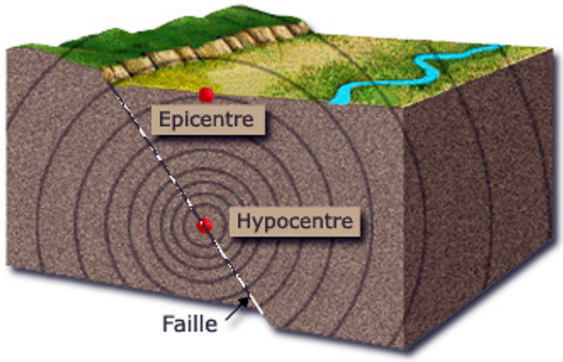


Fig. 15 - Représentation de l'hypocentre et de l'épicentre d'un séisme.

D'après le théorème de Pythagore, la distance hypocentrale peut donc s'exprimer en fonction de la distance épicentrale r et de la profondeur du séisme h :

$$R = \sqrt{r^2 + h^2} \tag{2}$$

Par suite, en mettant l'équation (1) sous forme exponentielle et en utilisant la relation (2), nous avons l'expression suivante

$$PGA = \exp\left\{6,74 + 0,859M_l - 1,8\ln\left(\sqrt{r^2+h^2} + 25\right) + B\right\}$$

Puis, en convertissant le PGA exprimé en cm/s^2 en g (1 cm/s^2≈981 g), nous obtenons la relation finale suivante

$$PGA = \exp\left\{-0,148 + 0,859M_l - 1,8\ln\left(\sqrt{r^2+h^2} + 25\right) + B\right\} \tag{3}$$

L'équation (3) est la relation que nous utiliserons dans notre modèle pour simuler l'accélération maximale du sol sur le site de Fessenheim. Remarquons que le terme $0,859M_l$ montre bien que l'accélération maximale du sol croît avec la magnitude, alors que le terme $-1,8\ln\left(\sqrt{r^2+h^2} + 25\right)$ montre l'atténuation de l'accélération du sol à mesure que la distance hypocentrale augmente. Notons, qu'à magnitude et distance fixées, le PGA se distribue donc de manière Log-normale.

Initialement nous avions utilisé une équation calibrée sur des données françaises (voir SOURIAU [2006]). Cependant, celle-ci ne donnait pas de résultats satisfaisants car l'équation n'était pas calibrée pour des valeurs extrêmes de PGA. Elle avait donc tendance à produire des valeurs de PGA irréalistes. De plus, celle-ci avait le désavantage d'être dans une magnitude locale dite magnitude LDG [46] spécifique à la France. Son utilisation contraignait d'appliquer une conversion supplémentaire à nos données, de la magnitude locale

46. Laboratoire de Détection Géophysique du Commissariat à l'énergie atomique français

vers la magnitude LDG. C'est pourquoi, nous nous sommes tourné vers l'équation donnée dans CORNELL *et al.* [1979]. En effet, malgré le fait qu'elle soit calibrée sur des données américaines, cette relation offre l'avantage d'être valide pour de fortes magnitudes et ne nécessite qu'une seule conversion pour être implémentée à partir de notre catalogue.

3.4.2 Conversion M_w en M_l

Dans DOST *et al.* [2016] et GRÜNTHAL *et al.* [2009], les auteurs fournissent les différentes relations empiriques utilisées pour convertir les magnitudes locales de chaque catalogue régional en magnitude des moments afin de constituer le catalogue SHARE. Les résultats obtenus dans CORNELL *et al.* [1979] étant basés sur des magnitudes locales, nous avons précisément besoin de convertir les magnitudes des moments de notre catalogue pour créer notre modèle.

Pour convertir la magnitude locale en magnitude des moments, l'équation donnée dans GRÜNTHAL *et al.* [2009] est valable pour l'Allemagne, la Belgique, la France et les Pays-Bas. Celle-ci a pour forme :

$$M_w = 0,53 + 0,646M_l + 0,0376M_l^2 \qquad \forall M_l > 0 \tag{4}$$

En posant $a = 0,53$; $b = 0,646$ et $c = 0,0376$ et en inversant l'équation (4) nous obtenons :

$$M_l = \sqrt{\frac{M_w - a}{c} + \frac{b^2}{4c^2}} - \frac{b}{2c} \qquad \forall M_w > 0,53 \tag{5}$$

Finalement, en remplacant a, b et c par leurs valeurs dans l'équation (5) nous avons :

$$M_l = \sqrt{26,5957M_w + 59,6997} - 8,5904 \qquad \forall M_w > 0,53 \tag{6}$$

En revanche, dans le cas de la Suisse les magnitudes utilisées pour constituer le catalogue SHARE sont déjà en magnitude des moments. Par conséquent, aucune conversion n'a été effectuée pour uniformiser le catalogue Suisse avec les autres pays du catalogue SHARE. Ainsi, pour convertir ces données en magnitude locale, nous avons utilisé les équations proposées dans DOST *et al.* [2016].

$$M_w = 1,327 + 0,253M_l + 0,085M_l^2 \qquad \forall M_l \leq 4 \tag{7}$$
$$M_w = M_l - 0,3 \qquad \forall M_l > 4 \tag{8}$$

En appliquant la même opération que pour le passage de l'équation (5) à (6), nous obtenons :

$$M_l = \sqrt{11,7647M_w - 13,3969} - 1,4882 \qquad \forall M_w \leq 3,7 \tag{9}$$
$$M_l = M_w + 0,3 \qquad \forall M_w > 3,7 \tag{10}$$

Le fait de disposer des relations utilisées pour construire le catalogue est d'une aide précieuse, cela nous évite de devoir poser des hypothèses quant à la conversion à effectuer. Grâce aux équations fournies, nous sommes en mesure de convertir la magnitude des moments de notre base de données en magnitude locale et ainsi exploiter la relation

développée dans CORNELL *et al.* [1979]. Afin d'avoir une vue d'ensemble des conversions effectuées pour chaque pays, nous résumons celles-ci dans la table ci-dessous.

Pays	Conversion $M_w \rightarrow M_l$	
Allemagne Belgique France Pays-Bas	$M_l = \sqrt{26,5957M_w + 59,6997} - 8,5904$	$\forall M_w > 0,53$
Suisse	$M_l = \sqrt{11,7647M_w - 13,3969} - 1,4882$ $M_l = M_w + 0,3$	$\forall M_w \leq 3,7$ $\forall M_w > 3,7$

Tab. 3 - table des conversions M_w vers M_l.

3.5 Préparation de la carte des régions sismotectoniques

Dorénavant, nous disposons d'une équation appropriée nous permettant de simuler des valeurs de *PGA* à partir de notre catalogue de sismicité. Cependant, la carte des régions sismotectoniques telle que présentée en figure 11 n'est pas utilisable en tant que telle. Pour le moment il ne s'agit en effet que d'une simple image au format PNG. Or, pour appliquer la réglementation en vigueur, nous avons besoin d'extraire de la carte chaque polygone représentant une région sismotectonique. En procédant à un retraitement de l'image et en y introduisant un système de coordonnées adapté, nous allons rendre l'information à priori non structurée de la carte en données exploitables.

3.5.1 Principe de base de l'analyse d'image

L'analyse d'image est une technique permettant de décomposer une image élément par élément (i.e. pixel par pixel). Informatiquement, les formats classiques tels que le JPG ou le PNG stockent l'image sous une forme matricielle appelée *raster*. Dans le cas d'une simple image couleur, un *raster* divise l'espace de façon régulière en pixel tout en associant à chacun d'eux leurs intensités lumineuses [47].

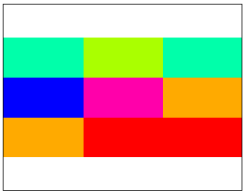


Fig. 16 - Exemple simple de *raster* généré sous R de taille 3×3 soit 9 pixels.

Dans le cadre d'une image représentant des données dans l'espace (cas de la carte des régions sismotectoniques), les *rasters* sont généralement géoréférencés [48] et chaque pixel est associé à une ou plusieurs variables (quantitative ou qualitative). Par exemple, pour une image représentant une tempête en France, en plus d'une coordonnée, une vitesse de vent et/ou un niveau de précipitation peuvent être associés à chaque pixel. De plus,

47. l'intensité lumineuse est en générale représentée par le code couleur : rouge ; vert ; bleu.
48. le géoréférencement consiste à affecter un système de coordonnées à une entité cartographique.

une fois le géoréférencement d'un *raster* connu, il est alors possible de le recouper avec d'autres données représentées dans le même référentiel.

3.5.2 Traitement de l'image des régions sismotectoniques

La résolution spatiale d'une image revêt une importance capitale car elle caractérise la surface au sol représentée par chaque pixel qui est l'élément le plus petit de l'image. Pour une surface fixe, plus la résolution de l'image est élevée plus la surface de chaque pixel est petite et donc l'information est disponible à un niveau plus fin. En reprenant l'exemple de la tempête, dans un cas extrême où la carte est représentée par 1000 pixels seulement, nous pourrions lui affecter une valeur de vitesse tous les 500 km^2, alors que si l'image contient 1 000 000 pixels nous pourrions lui attribuer une vitesse tous les 500 m^2, ce qui est nettement plus précis. Dans notre cas, la qualité médiocre de la carte originale (figure 10) de 397 $\times$ 377 pixels empêche de pouvoir exploiter de manière acceptable les zones sismotectoniques. C'est pourquoi, nous lui préférons sa version simplifiée (figure 11) de résolution 1024 $\times$ 1051.

Le but recherché dans le retraitement de la carte est de pouvoir déterminer le système de coordonnées dans lequel elle est représentée, puis d'en extraire chaque région sismotectonique. Une fois ces étapes réalisées, nous serons donc en mesure de recouper la carte avec notre catalogue de sismicité et la localisation du site de Fessenheim. *In fine*, lorsque nous aurons modélisé la magnitude et la survenance des séismes nous pourrons également simuler la localisation des séismes région par région, et par suite, déterminer la distance avec le site de Fessenheim. Nous aurons ainsi tout les éléments pour implémenter l'accélération maximale du sol au niveau de la centrale.

Une des difficulté du traitement est dû au fait qu'a priori, nous ne connaissons pas le système de coordonnées de référence dans lequel est représentée la carte. En effet, la carte étant initialement stockée au format PNG, aucune information n'est rattachée aux pixels, si ce n'est l'intensité lumineuse. En revanche, l'image étant supposée représenter des zones géoréférencées, celle-ci doit logiquement avoir été conçue dans un certain système de coordonnées. C'est pourquoi, une fois le *raster* créé sous R à l'aide des packages *png* et *raster*, la première phase consiste à retrouver le système inconnu (s'il y en a un) de l'image. Pour cela, nous avons utilisé en guise d'étalon, une carte de la France dont le système est connu (figure 17 ci-dessous). Par défaut, cette carte est représentée dans le système officiel pour la France : le système géodésique RGF93 [49].

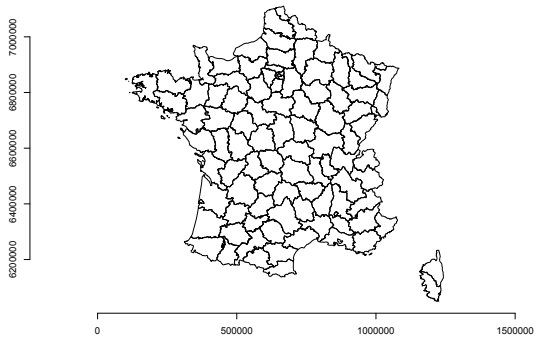


Fig. 17 - Carte étalon de la France représentée dans le système RGF93.

49. Réseau Géodésique Français 1993.

À partir de la carte étalon et de notre image, l'objectif consistait à superposer les contours de la France des deux cartes. Cependant, après plusieurs tests, il s'avère que les contours ne concordent pas lorsque la carte étalon est dans le système RGF93, ce qui implique que le système inconnu de l'image est autre que celui-ci. En effectuant différents tests de transformation du système de coordonnées de la carte étalon, nous avons pu trouver celui permettant de faire correspondre les contours, il s'agit donc du système jusque là inconnu de l'image : le WGS84 [50].

Les deux cartes données sur la page suivante illustre les deux superpositions réalisées. Le saut de page est ici volontaire, pour que le lecteur puisse mesurer la différence entre les deux superpositions nous avons souhaité les représenter sur la même page.

50. World Geodetic System 1984.

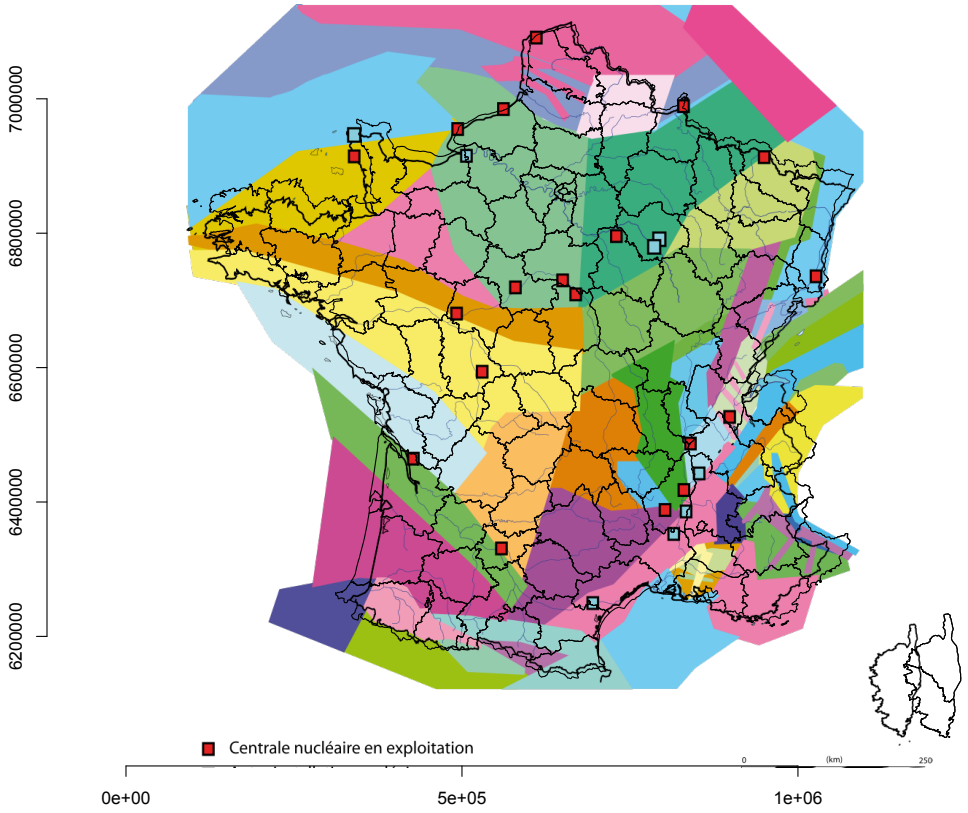


Fig. 18 - Superposition de l'image et de la carte étalon dans le système RGF93.

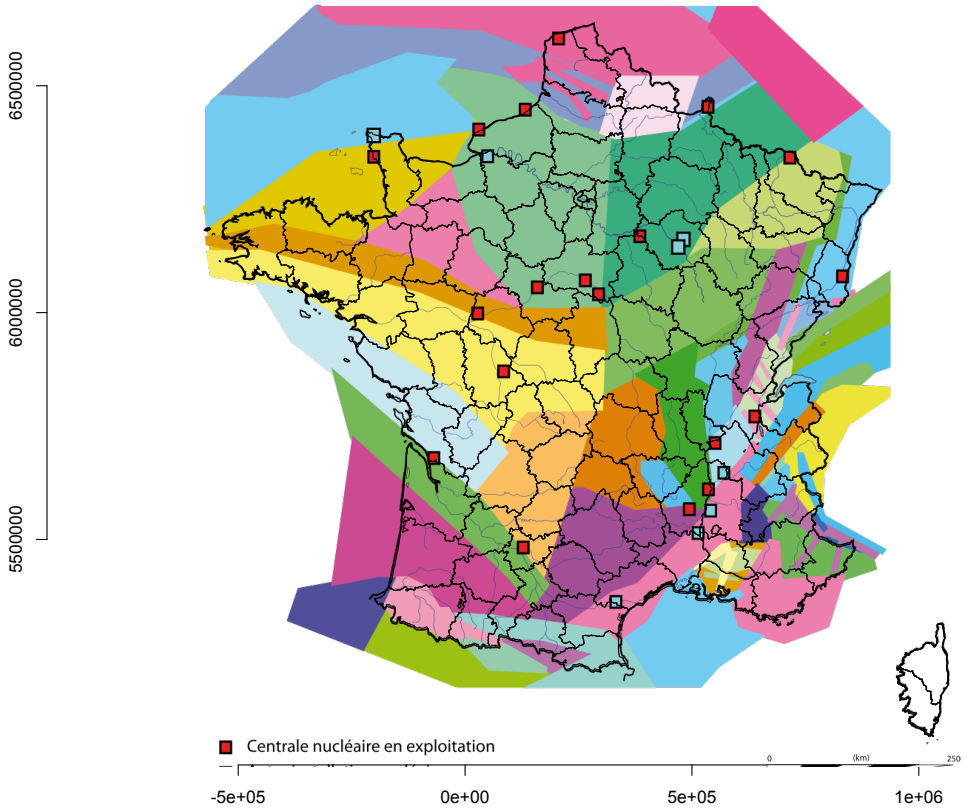


Fig. 19 - Superposition de l'image et de la carte étalon dans le système WGS84.

Comme nous pouvons le constater sur la figure 19, la superposition entre les frontières de la France des deux cartes est bonne, à l'exception du sud-est où un léger décalage subsiste. Cet écart pourra néanmoins être quantifié une fois que nous aurons affecter un système de coordonnées à l'image. Maintenant que nous savons que l'image est représentée en WGS84 nous pouvons assigner ce système géodésique au *raster* et ainsi géoréférencer la carte.

En revanche, avant de pouvoir exploiter pleinement la carte, un retraitement de certains pixels "gênants" doit être effectué. En effet, les seules informations d'intérêt sont les polygones représentant les régions sismotectoniques et les couleurs des pixels associés. Nous entendons ici par pixels "gênants", ceux ayant une couleur autre que celle d'une zone sismotectonique, c'est-à-dire, les contours de la France, les fleuves, les centrales nucléaires ou encore la légende. Ces pixels ayant une couleur différente des zones, nous empêchent de capturer entièrement la forme des polygones associés à ces régions. Notons que nous ne souhaitons pas conserver les centrales nucléaires (représentées par des carrés rouge sur la figure 19) car nous disposons déjà des coordonnées (longitude/latitude) dans le système WGS84 des centrales françaises. De plus, la représentation des centrales nucléaires sur la carte est trop grossière pour obtenir la localisation de manière précise.

Pour y parvenir, nous avons tout d'abord créé un référentiel à partir du code couleur héxadécimal des 75 régions sismotectoniques. Pour ce faire, nous avons affecté à chacun des 75 codes couleurs distincts un numéro de zone défini de manière arbitraire. De plus, nous avons rajouté une 76ème région artificielle correspondant à la partie blanche entourant les zones sismotectoniques. En plus de définir les zones par un numéro unique, l'intérêt principal de ce référentiel est de contenir uniquement les couleurs des régions sismotectoniques et par complémentarité d'identifier les pixels à retraiter.

Après avoir affecté à chaque pixel du *raster* le numéro de leur zone respective tel que défini dans le référentiel, l'étape suivante consiste à remplacer les pixels restants (ceux à corriger) par un numéro temporaire. Notre choix s'est porté arbitrairement sur le chiffre zéro.

Pour effectuer la correction, nous avons créé un algorithme parcourant le raster élément par élément, permettant de remplacer les pixels de valeur zéro en fonction de la valeur des pixels adjacents. Celui-ci automatise et permet de corriger la majeure partie du raster. Le principe de l'algorithme est le suivant :

Algorithme 1 Correction automatique des pixels de la carte des régions sismotectoniques

Entrée: M Matrice des pixels à corriger de taille $m \times n$
  $a \leftarrow m-1$; $b \leftarrow n-1$; $M_{Corr} \leftarrow M$
  tant que $\exists (i,j) \in \{2,\dots,a\} \times \{2,\dots,b\}$ tel que $M(i,j) = 0$ **faire**
    $M \leftarrow M_{Corr}$
    pour $i \in \{2,\dots,a\}$ **faire**
      pour $j \in \{2,\dots,b\}$ **faire**
        si $M(i,j) = 0$ **alors**
          $M_{Corr} \leftarrow max(M(i-1,j-1),\dots,M(i+1,j+1))$
        fin si
      fin pour
    fin pour
  fin tant que

Néanmoins, un problème subsiste tout de même dans certains cas de figure. En fait, nous avons les deux situations suivantes :

- 1er cas : si les pixels à traiter sont entourés par une unique zone, l'algorithme au fur et à mesure des itérations, remplacera bien toutes les valeurs à zéro de cette région par la valeur de la zone alentour ;
- 2ème cas : si les pixels à traiter sont à cheval sur plusieurs zones, les pixels adjacents peuvent avoir des valeurs différentes. Dans ce cas l'algorithme affectant aux pixels à corriger la valeur maximale des pixels adjacents, une légère déformation des zones apparaît.

Dans le deuxième cas de figure, nous avons procédé à une correction manuelle de la matrice de pixels contenant les numéros de zones sous une feuille Excel. Tout d'abord, nous avons créé une procédure *VBA* permettant de coloriser la matrice en fonction du référentiel des codes couleurs, et ce afin de mieux repérer les éléments problématiques après application de l'algorithme. Puis, nous avons corrigé manuellement chaque élément erroné de la matrice pour obtenir une carte la plus fidèle possible à l'original. La figure 20 ci-dessous illustre les traitements appliqués en fonction du cas rencontré.

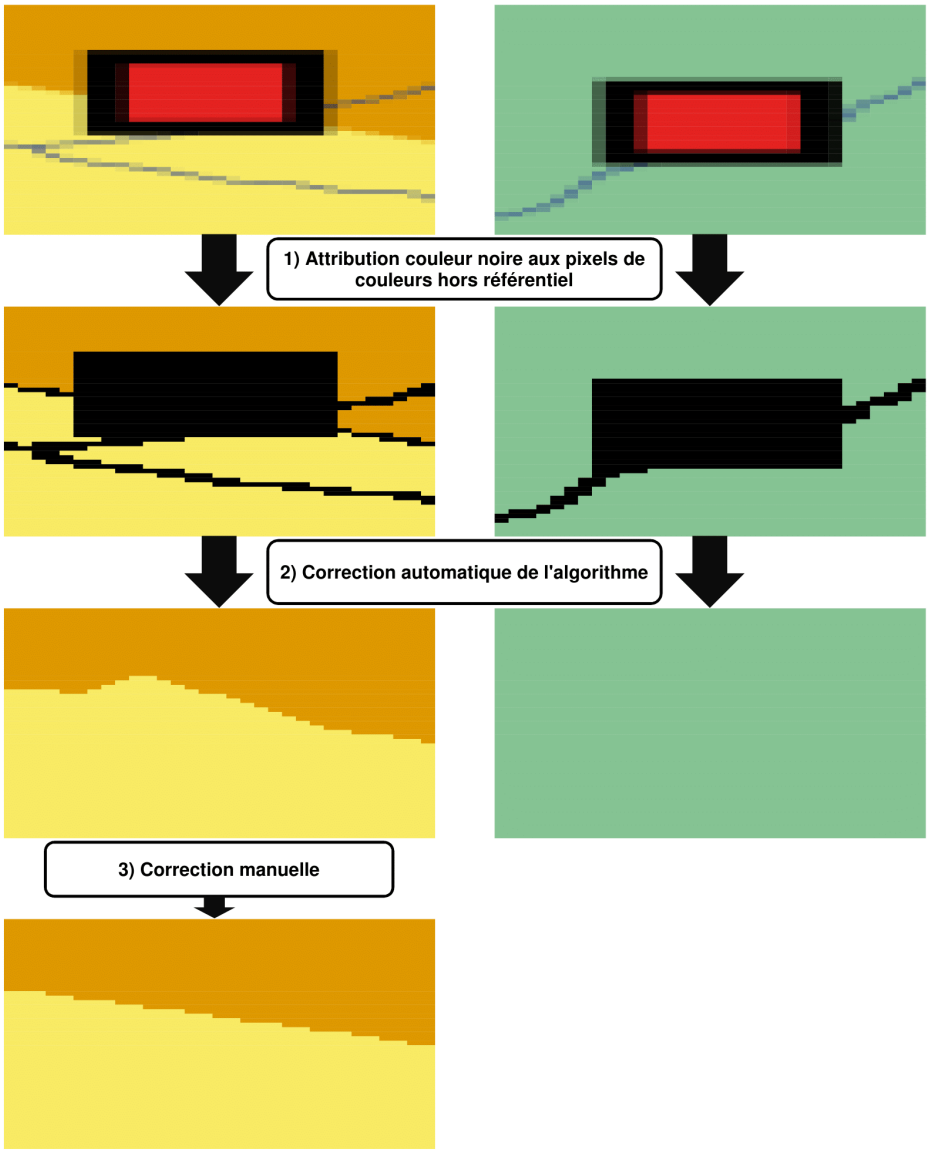


Fig. 20 - Correction des pixels de la carte des régions sismotectoniques en trois phases. À gauche, les pixels à corriger se situent entre deux zones sismotectoniques. À droite les pixels à corriger sont entourés d'une unique zone.

Finalement, après toutes ces étapes et une dernière correction manuelle des zones déformées par l'algortihme, nous obtenons la carte suivante :

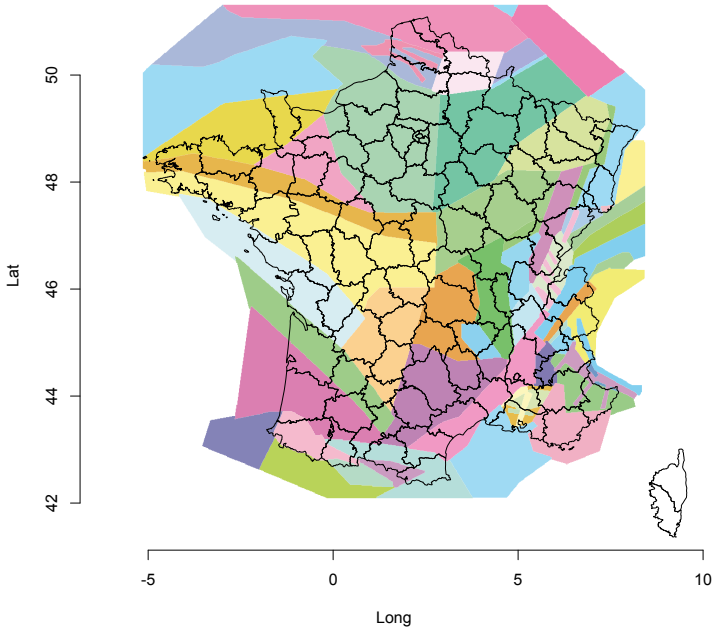


Fig. 21 - Carte des régions sismotectoniques finale après traitement et géocodage de l'image.

Sous R, à l'aide du package *sp*, cette carte[51] est conservée dans un objet nommé *SpatialpolygonsDataFrame*. Cet objet stocke chaque zone de la carte sous forme d'un polygone géoréférencé. Nous pouvons ainsi à notre guise extraire un ou plusieurs de ces polygones pour représenter un secteur en particulier. L'avantage de cet objet est qu'il est maintenant facile d'y associer tout type de données géoréférencées dans le système WGS84.

4 Préparation des entrées du modèle

Dans cette section, nous présenterons point par point la préparation des données réalisée en amont de l'implémentation du modèle d'accélération maximale au sol. Dans un premier temps, nous tâcherons d'expliquer la manière avec laquelle nous avons défini le seuil de résistance théorique du site de Fessenheim à partir de la réglementation et de la carte des régions sismotectoniques. Puis, en rappelant des éléments théoriques utilisés, nous montrerons comment nous allons générer l'aléa sismique à travers la modélisation[52] de la survenance, de la magnitude et de la localisation des séismes.

4.1 Extraction d'un sous-catalogue de sismicité

À partir de la carte, la première étape consiste à relier le catalogue de sismicité avec les polygones de la carte pour construire un sous-catalogue contenant les régions sismotecto-

51. La figure 21 est en fait la superposition de la carte après analyse avec la carte étalon.
52. À noter que toute la modélisation a été effectuée sous le logiciel libre R.

niques d'intérêts (celles utiles pour l'étude du risque sismique sur le site de Fessenheim). Pour y parvenir, nous avons créé un objet de type *SpatialPointsDataFrame*[53] dans le système WGS84 contenant toutes les coordonnées (latitude/longitude) et les caractéristiques des séismes du catalogue. Puis, nous avons associé chacun des séismes via leurs coordonnées aux zones auxquels ils appartiennent. Enfin, en ne conservant que les séismes ayant eu lieu dans la zone de Fessenheim et ses régions adjacentes nous pouvons extraire un sous-catalogue de sismicité. Après conversion de la magnitude (voir table 3), ses caractéristiques principales sont les suivantes :

Zone	M_l Moyenne	M_l Minimum	M_l Maximum	Nombre d'événements
5	4,56	3,56	6,02	54
9	4,54	3,75	5,10	3
32	4,12	3,61	4,80	5
54	4,35	2,96	5,57	66
59	4,43	3,44	5,42	2
60	4,10	2,36	6,78	77
61	4,36	3,88	4,77	3
75	4,51	2,80	6,02	16
Global	**4,43**	**2,90**	**6,78**	**226**

Tab. 4 - Sous-catalogue obtenu pour l'étude du risque sismique sur le site de Fessenheim.

4.2 Détermination du seuil de résistance théorique

Après avoir identifié les séismes de référence[54] de chaque zone du sous-catalogue de sismicité et conformément à la réglementation française, nous avons translaté ces séismes au plus proche du site de Fessenheim comme indiqué dans la section 3.2. Comme nous l'expliquions, pour un séisme situé dans la zone d'une centrale, celui-ci est directement déplacé sous le site. Dans ce cas simple, il suffit de remplacer les coordonnées du séisme par les coordonnées de la centrale nucléaire. En revanche, pour un séisme situé dans une zone adjacente, cela revient à trouver le point minimisant la distance entre cette zone et la centrale nucléaire. Dans ce cas, il est nécessaire de calculer la distance entre, d'une part, chaque point du polygone représentant la zone, et d'autre part, le site nucléaire. Néanmoins, le point minimisant la distance se situant nécessairement sur le bord du polygone, nous pouvons réduire le temps de calcul en ne conservant que les coordonnées situées aux extrémités de la zone. Pour trouver ce point, nous avons utilisé la formule d'Haversine permettant de calculer la distance entre deux points situés sur une sphère.

Formule d'Haversine

Pour tout couple de points situé sur une sphère, l'angle centrale entre ces deux points est donné par :

$$\mathrm{hav}\left(\frac{D}{R}\right) = \mathrm{hav}(\varphi_2 - \varphi_1) + \cos(\varphi_1)\cos(\varphi_2)\,\mathrm{hav}(\lambda_2 - \lambda_1)$$

53. Cet objet spatial représente un ensemble de points géoréférencés dans un système donné.
54. En extrayant le séisme de référence région par région, nous avons établi une carte des événements sismiques les plus importants à l'échelle de la France. Cette carte consultable à l'annexe E offre une vue d'ensemble des séismes majeurs ayant touchés la France.

où,

- hav est la fonction d'Haversine tel que :

$$\mathrm{hav}(\theta) = \frac{1-\cos(\theta)}{2} = \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

- D est la distance entre les deux points ;
- R est le rayon de la sphère ;
- φ_1, φ_2 les latitudes respectives des points 1 et 2 ;
- λ_1, λ_2 les longitudes respectives des points 1 et 2.

En appliquant la fonction d'Haversine inverse, on obtient :

$$\begin{aligned} D &= 2R\arcsin\left(\sqrt{\mathrm{hav}(\varphi_2-\varphi_1)+\cos(\varphi_1)\cos(\varphi_2)\,\mathrm{hav}(\lambda_2-\lambda_1)}\right) \\ &= 2R\arcsin\left(\sqrt{\sin^2\left(\frac{\varphi_2-\varphi_1}{2}\right)+\cos(\varphi_1)\cos(\varphi_2)\sin^2\left(\frac{\lambda_2-\lambda_1}{2}\right)}\right) \end{aligned} \tag{11}$$

En utilisant le rayon moyen de la terre ($\approx 6371,008$ kilomètres) comme valeur de R dans l'équation (11), nous pouvons ainsi trouver pour chaque zone le point minimisant la distance avec la centrale nucléaire. La représentation graphique des séismes ainsi translatés vers le site de Fessenheim est donnée ci-dessous figure 22 (les chiffres correspondent aux numéros des zones sismotectoniques déterminés de manière arbitraire).

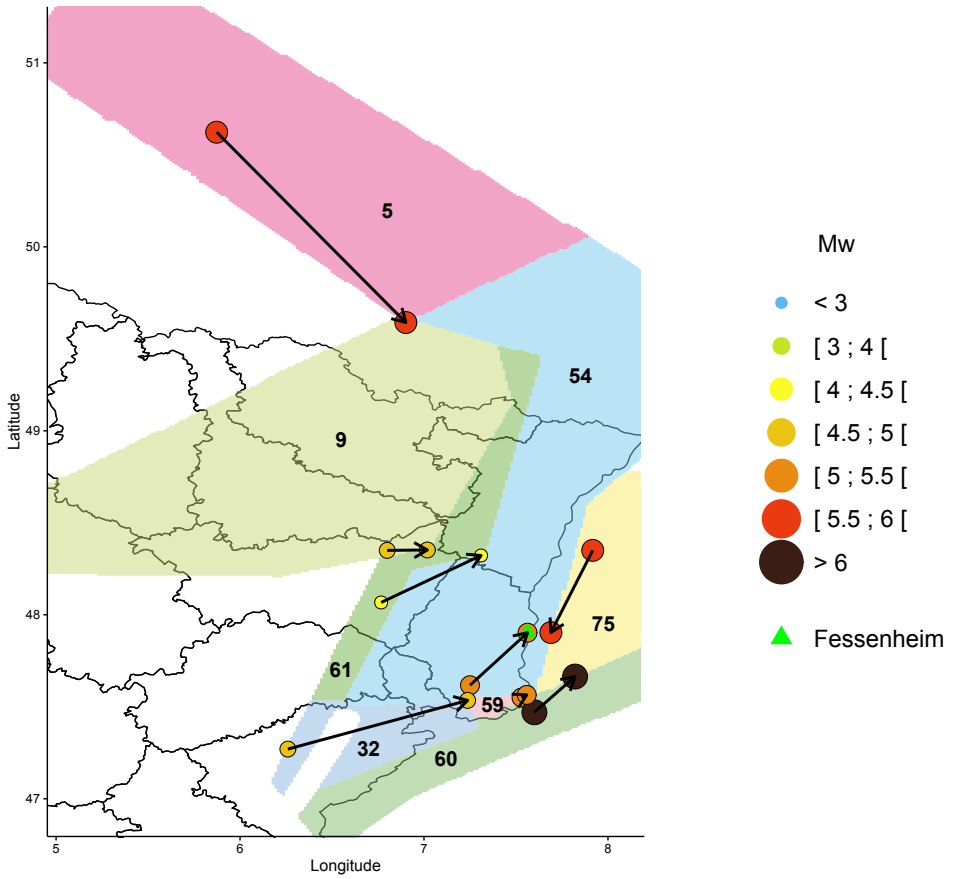


Fig. 22 - Translation des séismes de référence vers la centrale nucléaire de Fessenheim.

Maintenant que les séismes de référence de chaque zone sont translatés, conformément à la réglementation (voir 3.2), nous majorons leurs magnitudes des moments de 0,5 point et les convertissons en magnitude locale.

Dorénavant, tous les éléments sont réunis pour calculer l'accélération maximale du sol provoquée par ces séismes sur le site de Fessenheim et ainsi déterminer son séisme de référence et son seuil de résistance théorique.

Pour rappel la relation empirique définie par l'équation (3) au (3.4.1) utilisée pour calculer le PGA a la forme suivante :

$$PGA = \exp\Big\{ -0,148 + 0,859M_l - 1,8\ln\big(\sqrt{r^2+h^2}+25\big) + B\Big\}$$

En posant $\mu = -0,148 + 0,859M_l - 1,8\ln\big(\sqrt{r^2+h^2}+25\big)$ nous obtenons

$$\begin{aligned} PGA &= \exp\{\mu + B\} \\ &= \exp\{\widetilde{B}\} \end{aligned}$$

où $\widetilde{B} \sim \mathcal{N}(\mu; 0,325)$.

Dans un scénario déterministe où la magnitude, la localisation et la distance sont constantes, on reconnaît aisément la distribution Log-normale du PGA. Connaissant les caractéristiques de chacun des séismes translatés et majorés, nous pouvons donc déduire les paramètres de la loi Log-normale pour chacun d'eux. Ainsi, nous sommes en mesure de caractériser le pire scénario de PGA pouvant avoir lieu selon la réglementation sur le site de Fessenheim. Nous obtenons ainsi les résultats suivants :

Zone	Année	M_w historique	M_l majorée	Distance historique (Km)	Distance après translation (Km)	Profondeur (Km)	**PGA [g]**
60	1356	6,48	7,28	48,2	32,8	10	**0,340**
75	1728	5,78	6,47	56,3	9,5	24,1	**0,222**
54	1784	5,3	6,04	39,4	0	16,9	**0,218**
59	1650	5,12	5,92	39,3	37,6	10	**0,092**
32	2004	4,5	5,29	120,4	47,6	17	**0,040**
9	2003	4,8	5,57	75,4	64,3	12	**0,037**
61	1829	4,47	5,26	62	50,3	22,2	**0,035**
5	1692	5,78	6,47	326,4	193,6	10	**0,016**

Tab. 5 - Accélération maximale du sol pouvant être atteinte conformément à la réglementation sur le site de Fessenheim.

D'après le site [55] de l'IRSN, le séisme de référence devant être utilisé pour la conception de la centrale de Fessenheim est celui de Bâle en Suisse (1356) de magnitude des moments 6,48. Au vu des résultats obtenus (table 5), le séisme de référence obtenu concorde avec celui proposé par l'IRSN. En effet, le séisme historique générant la plus grande accélération maximale du sol est bien celui de Bâle (PGA de 0,34 g). Finalement, nous retenons donc ce séisme comme référence et déduisons le seuil de résistance théorique de 0,34 g pour le site de Fessenheim.

55. Lien vers l'article de l'IRSN : ici

4.3 Modélisation de la magnitude des séismes

Avant de rentrer plus en détail dans la modélisation de la magnitude des séismes, nous présentons ici les éléments théoriques utilisés ainsi que la justification de leurs utilisations dans notre étude.

4.3.1 Loi de Gutenberg-Richter

En sismologie, une des approches classiques pour modéliser l'aléa sismique consiste à établir une relation entre la fréquence et la magnitude. Cette relation fondamentale se retrouve dans de nombreuses études et a été observée pour différentes sources sismiques à travers le monde. Plus connue sous le nom de loi de Gutenberg-Richter [56], elle a la forme log-linéaire suivante :

$$\log_{10} N(m) = a - bm \tag{12}$$

avec les paramètres suivants :

- m : la magnitude (dans notre cas $m = M_l$) ;
- $N(m)$: le nombre de séismes de magnitude supérieure ou égale à m sur la période observée ;
- a : l'ordonnée à l'origine ;
- b : le coefficient de pente.

Le paramètre b souvent appelé *b-value* indique la proportion entre les petits et les grands séismes. Plus sa valeur est grande, plus le nombre de petits séismes par rapport aux grands est important. Le paramètre a, lui est lié au nombre total d'événements du catalogue, c'est-à-dire, en notant n le nombre de séismes total, $a = \log_{10}(n)$.

Lorqu'elle est vérifiée, la loi de Gutenberg-Richter implique que la taille des séismes se distribue de manière exponentielle. En effet, en remarquant que $\forall x > 0, \quad \log_{10}(x) = \frac{\ln(x)}{\ln(10)}$, l'équation (12) devient :

$$N(m) = e^{\alpha - \beta m} \qquad \text{avec} \quad \begin{cases} \alpha & = a\ln(10) \\ \beta & = b\ln(10) \end{cases} \tag{13}$$

En pratique, cette loi n'est observée qu'à partir d'un certain seuil de magnitude en raison de l'incomplétude des catalogues pour les petites magnitudes. En effet, pour une région donnée, tous les séismes importants ou remarquables étaient répertoriés, alors que, les événements de moindre importance ou même non perceptible par l'homme ne l'étaient que partiellement. Encore aujourd'hui, les événements de faible ampleur ne représentent pas d'intérêt particulier, c'est pourquoi, les appareils de mesure modernes ne capturent pas l'ensemble des petits séismes. Ainsi, en introduisant un seuil de magnitude noté m_0 dans l'équation (13) celle-ci peut se réécrire de la façon suivante :

$$\begin{aligned} N(m) &= e^{\alpha - \beta m_0} e^{-\beta(m - m_0)} \\ &= N(m_0) e^{-\beta(m - m_0)} \end{aligned} \tag{14}$$

56. À ce sujet, voir GUTENBERG et RICHTER [1942].

d'où,

$$\frac{N(m)}{N(m_0)} = e^{-\beta(m-m_0)} \qquad \forall m \geq m_0 \tag{15}$$

Avec $N(m_0) = e^{\alpha-\beta m_0}$: le nombre total de séismes de magnitude supérieure ou égale au seuil m_0 sur la période observée.

À partir de l'équation (15) on reconnaît l'expression de la fonction de survie de la loi exponentielle décalée[57]. Par suite, nous pouvons déduire sa fonction de répartition et donc sa densité conditionellement à $M \geq m_0$. Plus précisément :

$$\bar{F}_M(m) = \mathbb{P}[M \geq m | M \geq m_0] = \frac{N(m)}{N(m_0)} = e^{-\beta(m-m_0)} \qquad \forall m \geq m_0$$

Et donc

$$f_M(m) = \frac{d}{dm}(1 - \bar{F}_M(m)) = \frac{d}{dm}F_M(m) = \beta e^{-\beta(m-m_0)} \tag{16}$$

Grâce à la relation établie par Gutenberg et Richter et sous réserve d'un seuil correctement choisi, nous disposons d'un cadre statistique pour simuler la magnitude des séismes.

De par sa construction, la loi de Gutenberg-Richter suggère deux méthodes d'estimation de la *b-value*. D'une part la relation linéaire entre $N(m)$ et m suggère une estimation par les moindres carrés ordinaires, tandis que, la forme exponentielle de $\frac{N(m)}{N(m_0)}$ sous-entend une estimation du paramètre β par maximum de vraisemblance. Dans ce cas, sachant que $\beta = b\ln(10)$ nous pourrons être en mesure de fournir une estimation de la *b-value*.

4.3.2 Modèle de régression linéaire simple et estimateur MCO

Le modèle de régression linéaire simple pour un individu i a pour forme :

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \epsilon_i$$

avec,

- y_i : les variables à expliquer ;
- x_i : les variables explicatives ;
- ϵ_i : l'erreur ou le bruit tel que :
  - $\mathbb{E}[\epsilon_i] = 0$;
  - $Var[\epsilon_i] = \sigma^2 \quad \forall i$ (homoscédasticité) ;
  - $Covar[\epsilon_i, \epsilon_j] = 0 \quad \forall i \neq j$ (non corrélation).
- β_0, β_1 : les coefficients de régression (paramètres du modèle).

Dans ce modèle l'estimation de β_0 et β_1 par MCO revient à chercher les coefficients minimisant la distance euclidienne entre les variables à expliquer (y_i) et les variables explicatives (x_i), c'est-à-dire :

57. Communément appelée *Shifted exponential*.

$$\underset{\beta_0,\beta_1}{argmin}\Delta(\beta_0,\beta_1) = \underset{\beta_0,\beta_1}{argmin}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i)^2$$

En cherchant à annuler les dérivées partielles par rapport à β_0 et β_1 nous obtenons le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} \dfrac{\partial\Delta(\beta_0,\beta_1)}{\partial\beta_0} = -2\sum_{i=1}^{n}(y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i) & = 0 \\ \dfrac{\partial\Delta(\beta_0,\beta_1)}{\partial\beta_1} = -2\sum_{i=1}^{n}(y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i)x_i & = 0 \end{cases}$$

La résolution de ce système conduit aux estimateurs $\hat{\beta}_0$ et $\hat{\beta}_1$ de β_0 et β_1 suivants :

$$\begin{cases} \hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 - \bar{x} \\ \hat{\beta}_1 = \dfrac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} = \dfrac{Covar[x,y]}{Var[x]} \end{cases}$$

De plus, sous les hypothèses du modèle, le théorème de Gauss-Markov énonce que les estimateurs des MCO sont les meilleurs estimateurs sans biais ($BLUE$[58]). La notion de meilleur estimateur est dû au fait que les estimateurs des MCO sont ceux à variance minimale parmi les estimateurs linéaires sans biais.

Coefficient de détermination R^2

Une manière classique de mesurer la qualité de l'ajustement par une régression linéaire est d'utiliser le coefficient de détermination R^2. Le R^2 représente la part de variabilité expliquée par le modèle par rapport à la variabilité totale. Il est construit à partir de la décomposition de la variance de y_i suivante :

$$\underbrace{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}_{SC_{tot}} = \underbrace{\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - \bar{y})^2}_{SC_{reg}} + \underbrace{\sum_{i=1}^{n}\hat{\epsilon}_i^{\,2}}_{SC_{res}} \quad \text{avec} \quad \hat{\epsilon}_i = y_i - \hat{y}_i$$

Où les acronymes SC_{tot}, SC_{reg} et SC_{res} désignent respectivement :

- La somme des carrés totale ;
- La somme des carrés de la régression ;
- La somme des carrés des résidus.

À partir de la décomposition le R^2 s'exprime de la manière suivante :

$$R^2 = \frac{\text{Variance expliquée par le modèle}}{\text{Variance totale}} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2} = \frac{SC_{reg}}{SC_{tot}}$$

58. Best Linear Unbiased Estimator.

ou de façon équivalente,

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^{n}\hat{\epsilon_i}^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\hat{\epsilon_i}^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{SC_{res}}{SC_{tot}}$$

Dans le modèle de régression simple, plus le R^2 se rapproche de 1, plus la qualité de l'ajustement de la régression est bonne, à l'inverse, plus il est proche de 0, plus l'ajustement est mauvais. En revanche, si le R^2 constitue une bonne mesure de la qualité de l'ajustement dans le cadre d'une régression simple, ceci n'est plus exactement le cas dans un modèle de régression multiple [59] car le R^2 augmente naturellement avec le nombre de variables explicatives.

4.3.3 Estimateur du maximum de vraisemblance (EMV) dans un cadre continu

Soit $X_1, \ldots, X_n$ une suite de variables aléatoires i.i.d et $\mathcal{L}(\theta)$ la loi continue des X_i de densité f_θ, alors la fonction vraisemblance de l'échantillon $x = (x_1, \ldots, x_n)$ pour $\mathcal{L}(\theta)$ est définie par la densité jointe [60] des x_i :

$$L(x;\theta) := f_\theta(x_1) \times f_\theta(x_2) \times \ldots \times f_\theta(x_n) = \prod_{i=1}^{n} f_\theta(x_i)$$

La fonction de vraisemblance informe sur la probabilité d'avoir bien observé l'échantillon x. Pour que la probabilité d'observer l'échantillon soit maximale, le but est de maximiser la fonction de vraisemblance. Cependant, en pratique, il est plus aisé de maximiser une transformation de la vraisemblance par le logarithme népérien tel que $l(x;\theta) = \ln(L(x;\theta))$. La fonction l étant une fonction monotone croissante sur $\mathbb{R}_+^*$ alors, si $\hat{\theta}$ maximise $l(x;\theta)$ il maximise également $L(x;\theta)$.

Si L est différentiable et admet un maximum global, alors l'estimateur $\hat{\theta}$ du maximum de vraisemblance s'obtient en résolvant l'équation suivante :

$$\frac{\partial L(x;\theta)}{\partial \theta} = 0 \tag{17}$$

EMV de la loi de Gutenberg-Richter

Pour la loi de Gutenberg-Richter l'expression (17) admet une solution explicite et l'EMV du paramètre β s'obtient simplement. Dans ce cas, La fonction de vraisemblance s'écrit

$$L(m;\beta) = \prod_{i=1}^{n} f_{M_\beta}(m_i) = \prod_{i=1}^{n} \beta e^{-\beta(m_i - m_0)}) = \beta^n \exp\{-\beta \sum_{i=1}^{n}(m_i - m_0)\}$$

59. Dans ce cas, on lui préfère généralement le $R^2_{\text{ajusté}}$ prenant en compte le nombre de variables explicatives introduites dans le modèle pour quantifier sa parcimonie.

60. Comme les x_i sont indépendants la densité jointe est donnée par le produit de leurs densités marginales.

L'équation de log-vraisemblance est donnée par

$$l(m;\beta) = \ln(L(m;\beta)) = n\ln(\beta) - \beta\sum_{i=1}^{n}(m_i - m_0) = n\ln(\beta) + \beta n m_0 - \beta\sum_{i=1}^{n} m_i$$

Maximiser la log-vraisemblance revient résoudre l'équation suivante

$$\frac{\partial}{\partial\beta}\left[n\ln(\beta) + \beta n m_0 - \beta\sum_{i=1}^{n} m_i\right] = \frac{n}{\beta} + n m_0 - \sum_{i=1}^{n} m_i = 0$$

Finalement, nous obtenons l'estimateur du maximum de vraisemblance $\hat{\beta}$ puis par déduction [61], l'estimateur $\hat{b}$ de la *b-value*

$$\hat{\beta} = \frac{1}{\bar{m} - m_0} \qquad \text{avec} \quad \bar{m} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} m_i \tag{18}$$

$$\hat{b} = \frac{1}{\ln(10)(\bar{m} - m_0)} \tag{19}$$

4.3.4 Méthode du *bootstrap*

Le *Bootstrap* est un ensemble de méthode d'inférence statistique introduite par Efron [62] (1979), dont le principe de base est d'approcher par des simulations de *Monte Carlo* la distribution d'une statistique (originalement la variance) d'un échantillon donné à partir d'une succession de ré-échantillonnage. À l'origine, très coûteuse en temps de calcul, cette technique s'est peu à peu démocratisée à mesure des progrès informatiques pour devenir aujourd'hui une méthode très populaire de par sa simplicité d'implémentation et ses conditions d'application moins restrictives que d'autres méthodes d'inférences. Celle-ci a également l'avantage de pouvoir s'utiliser dans un cadre paramétrique et non-paramétrique.

De nombreuses techniques liées au *Bootstrap* existent, nous ne présentons ici que les techniques utilisées pour approcher la distribution et l'incertitude liées au seuil et à la *b-value* de la loi de Gutenberg-Richter.

Bootstrap non-paramétrique

Supposons que nous disposons d'un échantillon $x = (x_1, \ldots, x_n)$ provenant d'une loi F inconnue dont nous souhaitons étudier un paramètre ou une statistique $T(x)$, avec x_i indépendants et identiquement distribués (i.i.d). Dans ce cas, le principe du *Bootstrap* consiste à réaliser les étapes suivantes :

1. Fixer le nombre B d'échantillons *Bootstrap* à réaliser (en général $B \in [1000, 2000]$) ;
2. Ré-échantilloner x pour obtenir un échantillon $x^{*(b)} = (x_1^{*(b)}, \ldots, x_n^{*(b)})$ constitués à partir du tirage avec remise de n valeurs dans x ;

61. Car $\beta = b\ln(10)$, voir équation (15).
62. Voir EFRON [1979].

3. Calculer l'estimateur $T(x^{*(b)})$ de $T(x)$ à partir de l'échantillon $x^{*(b)}$ et stocker le résultat ;
4. Répéter l'étape 2 et 3 B fois.

La réalisation de ces quatre étapes permet d'obtenir une distribution empirique $(T(x^{*(1)}),\ldots,T(x^{*(n)}))$ approximant la vrai distribution de $T(x)$. À partir de cette distribution il est désormais possible de construire un intervalle de confiance.

Bootstrap paramétrique

Supposons que nous disposons d'un échantillon $x = (x_1, \ldots, x_n)$ provenant d'une loi F_θ connue définie par un jeu de paramètres θ. Dans ce cas, le principe du *Bootstrap* est le suivant :

1. Calculer l'estimateur $\hat{\theta}$ de θ (par exemple par maximum de vraisemblance) ;
2. Fixer le nombre B d'échantillons *Bootstrap* à réaliser ;
3. Créer un échantillon $x^{*(b)} = (x_1^{*(b)}, \ldots, x_n^{*(b)})$ en simulant n valeurs de la loi $F_{\hat{\theta}}$;
4. Calculer l'estimateur $\hat{\theta}^{*(b)}$ de θ à partir de l'échantillon $x^{*(b)}$ et stocker le résultat ;
5. Répéter l'étape 3 et 4 B fois pour obtenir une distribution empirique $(\hat{\theta}^{*(1)}, \ldots, \hat{\theta}^{*(n)})$ approchant celle de θ.

Intervalle de confiance percentile

Un autre avantage de cette approche est qu'en se basant directement sur les quantiles de la distribution obtenue par *Bootstrap*, nous pouvons construire un intervalle de confiance de niveau 100(1-α)% sans faire d'hypothèse (en particulier de normalité) sur la distribution de l'estimateur, on parle alors d'intervalle percentile. En notant $\hat{G}$ la fonction de répartition empirique de cette distribution, l'intervalle de confiance est construit avec les quantiles d'ordres $\alpha/2$ et $1-\alpha/2$ tel que :

$$IC_{100(1-\alpha)\%} = \left[\hat{G}^{-1}(\alpha/2), \hat{G}^{-1}(1-\alpha/2)\right]$$

Intervalle de confiance percentile corrigé (*BCa*)

L'approche précédente, même si elle ne contraint pas à faire l'hypothèse de normalité, peut ne pas avoir de bonnes performances. Pour palier ce problème, Efron proposa dans EFRON [1987] une version améliorée de l'intervalle de confiance percentile : l'intervalle *BCa* pour *accelerated bias-corrected percentile*. L'idée du *BCa* est de modifier l'intervalle percentile à partir de la correction du biais de l'estimateur et du coefficient d'asymétrie de l'échantillon *Bootstrap*.

Pour illustrer l'implémentation du *BCa* nous utilisons les notations suivantes :

- ϕ : la fonction de répartition d'une loi normale centrée réduite ;
- $\hat{\theta}$: l'estimateur du paramètre θ ;
- $\hat{G}$: la fonction de répartition de l'échantillon *Bootstrap* ; $(\hat{\theta}^{*(1)}, \ldots, \hat{\theta}^{*(n)})$;
- $\hat{\theta}_{(-i)}$: l'estimateur de θ obtenu avec l'échantillon d'origine sans la i^{ème} valeur ;
- $\bar{\hat{\theta}}_{-}$: la moyenne des $\hat{\theta}_{(-i)}, \quad i =, \ldots, n$.

La constante z corrigeant le biais est donnée par

$$z = \phi^{-1}(\hat{G}(\hat{\theta}))$$

Le facteur d'accélération a, approché par le coefficient d'asymétrie est

$$a = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\hat{\theta}_{(-i)} - \bar{\hat{\theta}}_{-})^3}{6\Big(\sum_{i=1}^{n}(\hat{\theta}_{(-i)} - \bar{\hat{\theta}}_{-})^2\Big)^{\frac{3}{2}}}$$

Avec ces facteurs de correction z et a, Efron propose les quantités suivantes pour améliorer l'intervalle percentile

$$a_{\frac{\alpha}{2}} = \phi\left(z + \frac{z + z_{\frac{\alpha}{2}}}{1 - a(z + z_{\frac{\alpha}{2}})}\right) \quad \text{et} \quad a_{1-\frac{\alpha}{2}} = \phi\left(z + \frac{z + z_{1-\frac{\alpha}{2}}}{1 - a(z + z_{1-\frac{\alpha}{2}})}\right)$$

Finalement, l'intervalle de confiance corrigé à partir de ces quantités est

$$BCa_{100(1-\alpha)\%} = \big[\hat{G}^{-1}(a_{\frac{\alpha}{2}}), \hat{G}^{-1}(a_{1-\frac{\alpha}{2}})\big]$$

Remarquons que dans le cas où z et a sont nuls alors l'intervalle BCa est équivalent à l'intervalle percentile standard. En effet, si $z = 0$ et $a = 0$ alors

$$\begin{aligned} a_{\frac{\alpha}{2}} &= \phi(z_{\frac{\alpha}{2}}) = \phi\big(\phi^{-1}(\frac{\alpha}{2})\big) = \frac{\alpha}{2} \\ a_{1-\frac{\alpha}{2}} &= \phi(z_{1-\frac{\alpha}{2}}) = \phi\big(\phi^{-1}(1 - \frac{\alpha}{2})\big) = 1 - \frac{\alpha}{2} \end{aligned}$$

Test de Cramér-Von Mises

Tout comme le test de Kolmogorov-Smirnov, le test de Cramér-von Mises (CvM) est fondé sur l'écart entre les fonctions de répartition empirique et théorique. Là où le premier test se base sur la distance maximale [63] entre les deux fonctions de répartition, le deuxième se base sur la somme des différences. Par construction, le test de Kolmogorov-Smirnov est donc beaucoup plus sensible aux *outliers* que le test de Cramér-Von Mises. Or, dans le cas du sous-catalogue de sismicité, certains événements extrêmes (notamment le séisme de Bâle de magnitude des moments 6,48) peuvent accroître la statistique du test de Kolmogorov-Smirnov. C'est pourquoi, nous avons retenu le test de Cramér-Von Mises, qui est souvent plus puissant que le test de Kolmogorov-Smirnov. En pratique cette statistique représente une somme de distances quadratiques, l'ajustement est d'autant meilleur que la statistique est petite.

Soit $X_1, \ldots, X_n$ i.i.d. de fonction de répartition empirique F telle que $F_n = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \mathbb{1}_{[-\infty;x]}(X_i)$ et F_0 une distribution hypothétique dont nous souhaitons tester l'ajustement à F, alors la statistique du test est

63. La statistique du test de Kolmogorov-Smirnov est donné par $D_n = \sup_x |F_n(x) - F(x)|$.

$$\omega_n^2 = n \int_{-\infty}^{+\infty} (F_n(x) - F_0(x))^2 \, dF_0(x)$$

Pour être implémentée numériquement (voir D'AGOSTINO et STEPHENS [1986]) celle-ci peut se simplifier en

$$\omega_n^2 = \frac{1}{12n} + \sum_{i=1}^{n} \left(F_i - \frac{2i-1}{2n}\right)^2$$

À partir de ω_n^2, nous souhaitons tester au niveau α

$$H_0 : F = F_0 \quad \text{contre} \quad H_1 : F \neq F_0$$

La loi limite de cette statistique définie dans la table du test de Cramér-von Mises permet d'établir au niveau α souhaité la zone de rejet

$$\{\omega_n^2 > c\}$$

avec

- c $= H^{-1}(1-\alpha)$;
- H : la fonction de répartition de la loi limite.

En pratique, la table étant implémentée[64] sur R, pour un test de niveau $\alpha = 0,05$ nous vérifions que sous H_0, la *p-value* du test soit supérieure à 0,05 pour accepter H_0.

4.4 Choix du seuil et estimation du paramètre b (*b-value)*

Le choix du seuil de magnitude à partir duquel modéliser la loi exponentielle pour estimer la *b-value* est capital. Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes pour déterminer ce seuil, appelé magnitude de complétude[65]. Concrètement, celle-ci symbolise la magnitude à partir de laquelle les stations enregistrent l'exhaustivité des séismes. Réciproquement, les séismes de magnitudes inférieures ne sont pas captés en intégralité par les stations de mesure.

Dans un premier temps, afin d'approximer la magnitude de complétude de notre catalogue, nous utilisons une méthode commune en sismologie : la *MAXC* pour *Maximum Curvature*. Cette méthode de base détermine la magnitude de complétude comme étant la magnitude pour laquelle le plus grand nombre de séismes a été enregistré. Malgré sa simplicité apparente, celle-ci permet de fournir rapidement une première indication de la magnitude de complétude. Comme l'illustre la figure 23 (ci-dessous), dans notre situation nous obtenons un seuil de 4,15.

64. *package goftest.*
65. Voir MIGNAN et WOESSNER [2012] pour plus d'information au sujet de l'estimation de la magnitude de complétude.

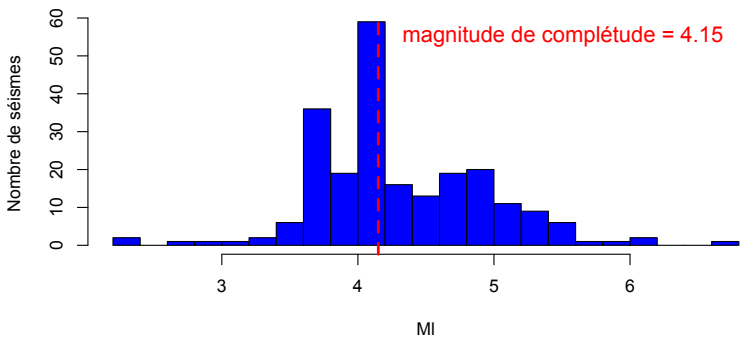


Fig. 23 - Distribution M_l : Détermination de la magnitude de complétude par la méthode *MAXC*.

En revanche, d'un point de vue statistique rien ne justifie que la loi de Gutenberg-Richter est acceptable pour modéliser la magnitude à partir du seuil défini par cette méthode. Ainsi, pour affiner cette première évaluation, nous avons adopté une approche plus statistique à travers les deux méthodes décrites précédemment : l'estimateur des moindres carrés ordinaires (MCO) et l'estimateur du maximum de vraisemblance (EMV).

Précisons que par construction, les zones de la carte des régions sismotectoniques sont indépendantes du point de vue de leur capacité à générer des tremblements de terre. Ce fait sous-entendrait donc de calibrer une loi de Gutenberg-Richter pour chaque zone. Malheureusement, à ce niveau de granularité (intra-zone), l'historique disponible est trop faible et la modélisation devient donc hasardeuse. Les tests de modélisation que nous avons conduit n'étaient pas satisfaisants. Dans la majorité des cas l'hypothèse de décroissance exponentielle du nombre de séismes en fonction de la magnitude n'était pas vérifiée par les tests. C'est pourquoi, nous sommes contraints de calibrer une loi de Gutenberg-Richter commune à toutes les zones à partir du sous-catalogue de sismicité. Pour rappel, celui-ci est composé des séismes de la zone de Fessenheim et ses zones adjacentes (voir table 4).

Pour chacune des méthodes (MCO et EMV), en faisant varier le seuil de magnitude, nous avons construit un estimateur de la *b-value*, ainsi que, les intervalles de confiance percentile et *BCa* correspondants. Finalement, pour déterminer la magnitude de complétude et la *b-value*, nous nous sommes notamment appuyé sur le test statistique de Cramér-Von Mises afin de mesurer l'adéquation des données à la loi de Gutenberg-Richter, et cela pour chaque valeur de seuil.

Intuitivement, nous nous attendons donc à trouver un seuil relativement proche de celui défini par la méthode *MAXC* en ajustant la loi Gutenberg-Richter au données. Pour ne pas surestimer la magnitude de complétude, nous retiendrons la magnitude minimum à partir de laquelle le test de CVM ne soit plus rejeté comme seuil de modélisation. Après quoi, nous comparerons les résultats obtenus pour chaque méthode afin de déterminer laquelle retenir.

4.5 Résultats de l'estimation de la magnitude de complétude et de la *b-value*

Les tables ci-dessous présentent les résultats de l'estimation de la *b-value* pour un seuil allant de 3,5 à 4,5 avec un pas de 0,1. Nous ajoutons également les résultats de l'estimation pour le seuil de 4,15 défini par la méthode *MAXC*.

Seuil	$\hat{b}_{value}$	Intervalle de confiance percentile (95%)	Intervalle de confiance *BCa*	Test de Cramér-Von Mises	*p-value*	R^2	Nombre de séismes
3,5	0,756	[0,710 ; 0,794]	[0,712 ; 0,796]	7,095	<0,001	0,968	214
3,6	0,764	[0,715 ; 0,801]	[0,720 ; 0,804]	5,209	<0,001	0,97	213
3,7	0,776	[0,732 ; 0,812]	[0,735 ; 0,815]	1,882	<0,001	0,972	210
3,8	0,795	[0,751 ; 0,831]	[0,754 ; 0,833]	3,233	<0,001	0,974	177
3,9	0,817	[0,775 ; 0,849]	[0,778 ; 0,852]	0,576	0,025	0,976	167
4	0,819	[0,778 ; 0,853]	[0,782 ; 0,857]	0,668	0,015	0,976	158
4,1	0,830	[0,787 ; 0,866]	[0,791 ; 0,870]	0,716	0,012	0,975	136
4,15	**0,833**	**[0,788 ; 0,872]**	**[0,792 ; 0,874]**	**0,754**	**0,009**	**0,974**	**135**
4,2	0,840	[0,792 ; 0,888]	[0,794 ; 0,891]	0,823	0,006	0,971	122
4,3	0,870	[0,825 ; 0,926]	[0,827 ; 0,929]	1,466	<0,001	0,975	91
4,4	0,902	[0,856 ; 0,972]	[0,856 ; 0,972]	0,972	0,003	0,978	83
4,5	0,931	[0,880 ; 1,019]	[0,879 ; 1,016]	0,543	0,031	0,980	78

Tab. 6 - Résultat de l'estimation de la *b-value* par MCO ; intervalles de confiance percentile et *BCa* réalisés à partir de 5000 échantillons *Bootstrap*.

Seuil	$\hat{b}_{value}$	Intervalle de confiance percentile (95%)	Intervalle de confiance *BCa*	Test de Cramér-Von Mises	*p-value*	Nombre de séismes
3,5	0,524	[0,463 ; 0,606]	[0,466 ; 0,614]	1,679	<0,001	214
3,6	0,554	[0,491 ; 0,637]	[0,494 ; 0,651]	1,213	<0,001	213
3,7	0,639	[0,563 ; 0,738]	[0,558 ; 0,731]	0,516	0,036	210
3,8	0,609	[0,531 ; 0,715]	[0,541 ; 0,734]	0,895	0,004	177
3,9	0,747	[0,649 ; 0,883]	[0,641 ; 0,870]	0,343	0,102	167
4	0,739	[0,636 ; 0,869]	[0,626 ; 0,861]	0,359	0,093	158
4,1	0,751	[0,647 ; 0,901]	[0,647 ; 0,906]	0,438	0,057	136
4,15	**0,819**	**[0,700 ; 0,981]**	**[0,693 ; 0,969]**	**0,727**	**0,011**	**135**
4,2	0,795	[0,677 ; 0,971]	[0,665 ; 0,952]	0,678	0,014	122
4,3	0,713	[0,593 ; 0,895]	[0,584 ; 0,877]	0,569	0,027	91
4,4	0,775	[0,640 ; 0,987]	[0,634 ; 0,979]	0,447	0,054	83
4,5	0,845	[0,691 ; 1,085]	[0,675 ; 1,055]	0,308	0,128	78

Tab. 7 - Résultat de l'estimation de la *b-value* par EMV ; intervalles de confiance percentile et *BCa* réalisés à partir de 5000 échantillons *Bootstrap*.

Tout d'abord, l'analyse des résultats montre que quelque soit la méthode d'estimation de la *b-value*, l'adéquation à la loi de Gutenberg-Richter est rejetée par le test de Cramér-Von Mises pour le seuil de 4.15 sélectionné par *MAXC*. Ensuite, nous remarquons que quelque soit le seuil, le test rejette l'adéquation de la loi de Gutenberg-Richter aux données pour les estimateurs obtenus par MCO, et ce malgré un R^2 proche de un. De plus, pour la méthode par EMV, la plus petite valeur de seuil pour laquelle le test de ne rejette plus la loi est de 3,9. Par conséquent, pour définir la magnitude de complétude, nous recherchons dans le sous-catalogue la magnitude minimum supérieure ou égale au seuil de 3,9, finalement, nous obtenons une valeur minimum de 3,98. Par suite, nous avons ainsi déterminé la valeur de m_0 de la loi de Gutenberg-Richter (équation 16). L'estimation de m_0 ne dépendant pas de la méthode choisie (uniquement liée au choix du seuil), il reste seulement à déterminer la méthode à retenir pour obtenir l'estimateur de la *b-value*, et, de manière équivalente, le paramètre β de la loi de Gutenberg-Richter.

Les résultats pour le seuil de 3,98 sont résumés dans la table ci-dessous. Dans la suite, nous noterons $\hat{b}^{MCO}$ et $\hat{b}^{EMV}$ ainsi que $\hat{\beta}^{MCO}$ et $\hat{\beta}^{EMV}$ les estimateurs obtenus respectivement par MCO et EMV pour le seuil de 3,98.

Méthode	m_0	$\hat{b}_{value}$	$\hat{\beta}$	*ICp(95%)*	*BCa*	Test CvM	*p-value*	Nombre de séismes
MCO	3,98	0,817	1,88	[0,775 ; 0,849]	[0,778 ; 0,852]	0,576	0,025	167
EMV		0,747	1,72	[0,649 ; 0,883]	[0,641 ; 0,870]	0,343	0,102	

Tab. 8 - Résultat de l'estimation de la *b-value* pour le seuil 3,9.

A priori, le test de Cramér-Von Mises oriente notre choix vers l'estimateur obtenu par EMV. Effectivement, la statistique du test est nettement meilleur pour l'EMV (0,343) que pour l'estimateur MCO (0,576). De plus, la *p-value* est en dessous de la valeur critique 0,05 pour l'estimateur MCO et donc le test rejette l'hypothèse nulle, alors que dans le cas de l'EMV, la *p-value* largement supérieure à la valeur critique invite à ne pas rejeter l'hypothèse nulle et à considérer que l'échantillon provient de la loi de Gutenberg-Richter. Cependant, l'incertitude liée à $\hat{b}^{EMV}$ est plus grande que pour $\hat{b}^{MCO}$. En effet, l'intervalle de confiance percentile à 95% de $\hat{b}^{EMV}$, même après correction avec la méthode *BCa*, est assez large contrairement à celui de $\hat{b}^{MCO}$.

Afin de compléter notre première analyse et vérifier la qualité de l'ajustement réalisé, nous procédons à un examen visuel de l'adéquation de la loi de Gutenberg-Richter à la fonction de répartition empirique, du *QQ-Plot* et du *PP-Plot*.

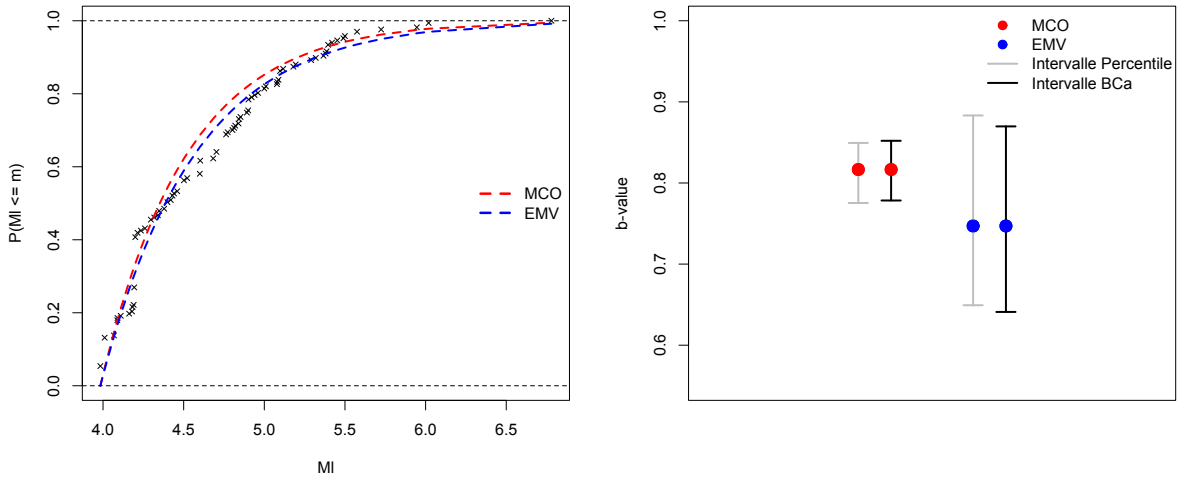


Fig. 24 - À Gauche : Ajustements de la loi de Gutenberg-Richter à la fonction de répartition empirique pour $\hat{\beta}^{MCO}$ et $\hat{\beta}^{EMV}$; À droite : *b-value* et intervalle *BCa* correspondant.

Visuellement, sur le graphique de gauche, nous constatons que l'ajustement semble plutôt bon pour les deux méthodes. De plus, la loi obtenue avec $\hat{\beta}^{EMV}$ semble la plus fidèle aux données, de la queue à gauche jusqu'à une magnitude d'environ 5,4, tandis que, la loi obtenue avec $\hat{\beta}^{MCO}$ semble mieux représenter la queue de distribution à droite. Le graphique de droite illustre le fait que les intervalles de confiance obtenus par *Bootstrap* sont nettement plus larges pour $\hat{\beta}^{EMV}$que pour $\hat{\beta}^{MCO}$.

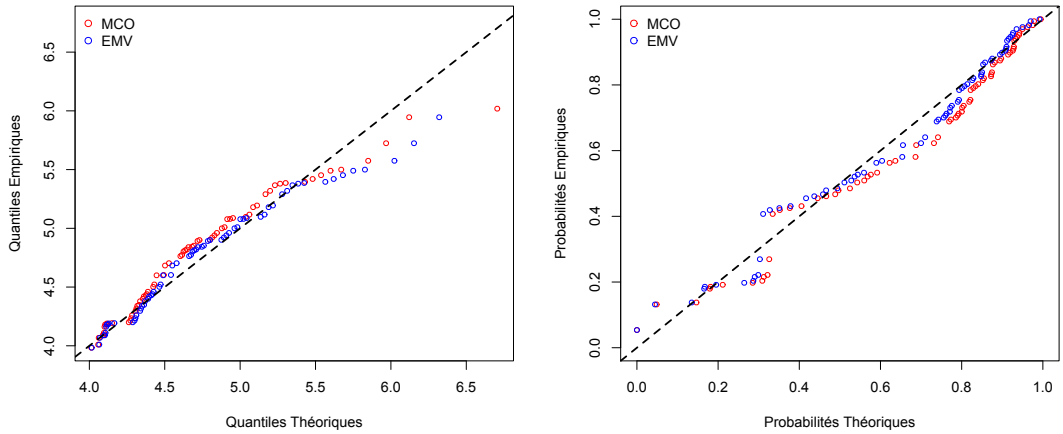


Fig. 25 - À gauche : Diagramme quantile-quantile (*QQ-plot*) ; À droite : Diagramme probabilité-probabilité (*PP-plot*).

Le *QQ-plot* et le *PP-plot* forment deux outils complémentaires. Le premier permet de mettre en lumière l'imprécision de l'ajustement au niveau des queues de distribution, alors que, le deuxième met en relief l'imprécision au centre de la distribution.

L'examen du *QQ-plot* et du *PP-plot* confirme les remarques établies précédemment. Pour le centre de la distribution, le *PP-plot* met en avant le meilleur ajustement de la loi de Gutenberg-Richter avec $\hat{\beta}^{EMV}$ qu'avec $\hat{\beta}^{MCO}$. À l'inverse, au niveau de la queue droite, le *QQ-plot* montre un meilleur ajustement avec $\hat{\beta}^{MCO}$. Généralement, l'ajustement est plutôt bon jusqu'au quantile 5,4 environ, mais manque un peu de précision dans les extrêmes.

Notre but initial étant de modéliser des évènements extrêmes, nous pourrions vouloir retenir l'ajustement réalisée par MCO, car celui-ci est plus proche des données au niveau de la queue à droite. Néanmoins, d'après le test de Cramér-Von Mises et l'analyse graphique, l'ajustement réalisée par EMV est plus précis dans son ensemble. Malgré une incertitude plus grande sur la valeur de $\hat{\beta}^{EMV}$, nous retenons ce paramètre pour modéliser la loi de Gutenberg-Richter. De plus, ce choix permet d'être conservateur dans notre modélisation. En effet, la loi de Gutenberg-Richter avec le paramètre $\hat{\beta}^{EMV}$a une queue[66] légèrement plus épaisse qu'avec le paramètre $\hat{\beta}^{MCO}$.

Finalement, la loi de Gutenberg-Richter retenue a pour densité

$$f_M(m) = \beta e^{-\beta(m-m_0)} = 1,72e^{-1,72(m-3,98)} \quad \forall m \geq 3,98 \tag{20}$$

Dans la suite, nous noterons respectivement $f_M(m)$ et $F_M(m)$ la densité et la fonction de répartition paramétrées par $\beta = 1,92$ et $M_0 = 3,98$. Par ailleurs, s'il n'y a pas d'ambiguïté M désignera la magnitude locale.

4.6 Prise en compte de l'historique propre à chaque zone

À ce jour, la magnitude est une échelle ouverte, dans le sens où aucune limite théorique n'a encore été établie. Néanmoins, la taille de la Terre fixe cette limite à l'échelle de notre planète. D'après le site de l'USGS[67], un séisme de magnitude 12 nécessiterait une faille

66. Voir figure 24.
67. Lien vers la page de l'USGS : https://earthquake.usgs.gov/learn/topics/megaqk_facts_fantasy.php

plus large que la Terre elle même. Ainsi, par souci de cohérence et de réalisme, nous procédons à une troncature à droite de la loi de Gutenberg-Richter. Telle que modélisée, la loi de Gutenberg-Richter n'a pas de limite et peut générer des séismes irréalistes. Par exemple, sur 100000 réalisations[68] de la loi, nous avons obtenu un séisme de magnitude 13,4 et 12,2. En outre, le fait de tronquer la loi de Gutenberg-Richter pour chaque zone sismotectonique, nous permet de prendre en considération leur propre historique, et ainsi, créer une loi plus adaptée à chaque région.

Principe de la troncature

Soit X une variable aléatoire continue à support réel. Notons F sa fonction de répartition et f la densité associée. la densité tronquée à droite $T_f(x)$ au niveau d'un réel y est

$$T_f(x) = f(x \mid X \leq y) \begin{cases} \dfrac{1}{F(y)} f(x) & \forall x \leq y \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

De plus, $T_f(x)$ est bien une densité

$$\int_{-\infty}^{y} T_f(x)dx = \frac{1}{F(y)} \int_{-\infty}^{y} f(x)dx = 1$$

Troncature de la loi de Gutenberg-Richter

Pour fixer la troncature, l'idéal aurait été d'avoir accès aux informations détaillées des failles composants les différentes régions sismotectoniques, et ainsi, d'être en mesure de déterminer la magnitude maximum pouvant être atteinte dans chacune d'entre elles. Cependant, n'ayant pas réussi à rassembler assez d'informations sur ces failles nous avons fait une hypothèse basée sur la réglementation. D'après cette dernière, pour évaluer la résistance théorique des centrales nucléaires, les séismes de référence sont majorés de 0,5 point de magnitude. Ainsi, nous avons choisi de fixer la troncature 0,5 point au-dessus de la majoration effectuée dans la réglementation.

Ce niveau de troncature représente une augmentation d'un point de magnitude par rapport au séisme de référence historique, soit un séisme pouvant libérer 32 fois plus d'énergie. Au vu des nombreuses incertitudes liées aux mesures des séismes historiques, ce choix paraît réaliste et autorise la simulation d'événements extrêmes jusque là non observés.

Les troncatures en fonction de la zone sismotectonique et du séisme de référence sont présentées dans la table ci-dessous :

68. L'implémentation de la loi sous R sera abordée dans la suite.

Zone	M_w historique	M_l historique	M_l majorée	Troncature loi Gutenberg-Richter
60	6,48	6,78	7,28	7,78
75	5,78	5,97	6,47	6,97
54	5,3	5,54	6,04	6,54
59	5,12	5,42	5,92	6,42
32	4,5	4,79	5,29	5,79
9	4,8	5,07	5,57	6,07
61	4,47	4,76	5,26	5,76
5	5,78	5,97	6,47	6,97

Tab. 9 - Troncature de la magnitude (M_l) de loi la Gutenberg-Richter propre à chaque zone sismotectonique.

Finalement, pour chaque région sismotectonique, nous obtenons huit lois de Gutenberg Richter différentes pour modéliser la magnitude des séismes de manière indépendante. La forme générale de ces lois est

$$f_M^{(Z)}(m) = f(m \mid M \leq m_T^{(Z)}) = \frac{f_M(m)}{F(m_T^{(Z)})} = \frac{\beta}{F(m_T^{(Z)})} e^{-\beta(m-m_0)} \quad \forall\, m_0 \leq m \leq m_T^{(Z)} \quad (21)$$

avec

- $f_M^{(Z)}(m)$: la densité tronquée de la zone Z ;
- $m_T^{(Z)}$: la magnitude de troncature de la zone Z.

Implémentation de la loi de Gutenberg-Richter

La loi de Gutenberg-Richter n'étant pas implémentée directement sous R, nous utiliserons la méthode d'inversion de la fonction de répartition afin de la simuler. Cette méthode repose sur le théorème ci-après.

Dans l'énoncé du théorème, nous noterons :

- Z : variable aléatoire réelle de fonction de répartition F ;
- U : une variable aléatoire de loi uniforme sur $[0, 1]$.

Théorème 1 *Soit F une fonction de répartition définie sur un intervalle $[a, b]$, de fonction inverse*

$$F^{-1}(u) = inf\{z \in [a, b] : F(z) \geq u\}.$$

Alors $Z = F^{-1}(U)$ est distribué suivant F.

Ce théorème est valide de par l'égalité suivante

$$\mathbb{P}(Z \leq z) = \mathbb{P}(F^{-1}(U) \leq z) = \mathbb{P}(U \leq F(z)) = F(z)$$

Dans le cas de la loi de Gutenberg-Richter, l'inverse de la fonction de répartition peut s'exprimer simplement car celle-ci a une forme analytique. En effet,

$$\begin{aligned}
& F_M(m) = 1 - e^{-\beta(m-m_0)} \\
\iff \quad & \ln(1-u) = -\beta(m-m_0) \\
\iff \quad & m = -\frac{1}{\beta}\ln(1-u) + m_0 \\
\iff \quad & F_M^{-1}(u) = -\frac{1}{\beta}\ln(1-u) + m_0
\end{aligned}$$

Or $\ln(1-U) \overset{\text{loi}}{=} \ln(U)$, donc

$$Z \sim F_M^{-1}(U) = -\frac{1}{\beta}\ln(U) + m_0 \tag{22}$$

Pour simuler la loi de Gutenberg-Richter tronquée sans passer par une méthode de rejet, qui consisterait à rejeter les magnitudes simulées supérieures au niveau de troncature, puis à resimuler une valeur tant que celle-ci n'est pas dans l'intervalle souhaitée, nous proposons d'inclure cette contrainte directement dans la simulation par inversion. Le but de cette démarche étant de réduire, autant que possible, le temps de calcul lors de la simulation de l'accélération maximale du sol.

Pour ce faire, nous recherchons la valeur maximum que peut prendre U pour ne pas excéder le niveau de troncature souhaité. En reprenant les notations de l'équation (21), cela revient à rechercher u tel que

$$-\frac{1}{\beta}\ln(u) + m_0 \leq m_T^{(Z)}$$

Nous avons,

$$-\frac{1}{\beta}\ln(u) + m_0 \leq m_T^{(Z)} \iff u \geq e^{-\beta(m_T^{(Z)}-m_0)} = \bar{F}_M(m_T^{(Z)})$$

Ainsi, En notant $\widetilde{U}$ la loi uniforme sur $[\bar{F}_M(m_T^{(Z)}), 1]$, nous obtenons la loi de Gutenberg-Richter tronquée supérieurement pour chaque zone

$$F_M^{(Z)-1}(\widetilde{U}) = -\frac{1}{\beta}\ln(\widetilde{U}) + m_0$$

Finalement, nous pouvons implémenter simplement la loi de Gutenberg-Richter tronquée, sans avoir recours à la méthode des rejets qui pourrait être coûteuse en temps de calcul, au vue du nombre de simulations de PGA que nous réaliserons.

4.7 Modélisation de la survenance des séismes

Pour modéliser une loi de fréquence annuelle des séismes de magnitudes supérieures ou égales à m_0, et, propre à chaque zone sismotectonique, nous avons utilisé la loi de Poisson, loi classique des événements rares. Pour une variable aléatoire X suivant une loi de Poisson de paramètre λ, la fonction de masse (probabilité d'avoir k occurences) est donnée par

$$p(k) = \mathbb{P}(X = k) = e^{-\lambda}\frac{\lambda^k}{k!}$$

L'utilisation de la globalité de l'historique de notre catalogue (1000-2006) paraît ne pas être adaptée pour calibrer le paramètre λ de la loi de Poisson. En effet, jusqu'au début du XXème siècle, avant l'avènement des appareils de mesure, les séismes n'étaient pas nécessairement répertoriés dans leur intégralité. En faisant l'hypothèse raisonnable que les séismes sont reportés de manière exhaustive depuis le début du XXème siècle, nous avons retenu une période de 100 ans, de 1906 à 2006, pour modéliser la survenance des séismes dans chaque région sismotectonique.

Le paramètre λ de la loi de Poisson représentant le nombre moyen d'occurrence sur une période donnée, nous calculons simplement la moyenne annualisée du nombre de séismes supérieures ou égales à m_0 (3,98) sur la période 1906-2006. C'est-à-dire, la quantité

$$\lambda^{(Z)} = \frac{N^{(Z)}(m_0)}{100}$$

avec

- $\lambda^{(Z)}$: le paramètre de loi de Poisson de la zone Z.
- $N^{(Z)}(m_0)$: le nombre de séismes de magnitudes supérieures ou égales à m_0 dans la zone Z ;

les résultats obtenus pour chaque zone sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Zone	$N^{(Z)}(m_0)$	$\lambda^{(Z)}$	**PGA [g]**
60	5	0,05	**0,340**
75	6	0,06	**0,222**
54	10	0,10	**0,218**
5	13	0,13	**0,016**
9	1	0,01	**0,037**
32	1	0,01	**0,040**

Tab. 10 - Paramètres de loi de Poisson de chaque zone sismotectonique.

Comme nous pouvons le remarquer, les zones 59 et 61 sont absentes de la table. Ceci, est dû au fait qu'aucun séisme de magnitude supérieure ou égale à 3,98 n'a été enregistré dans ces zones entre 1906 et 2006. En outre, d'après la table 5, la capacité à générer une accélération maximale au sol élevée de ces zones sur le site de Fessenheim est faible (0,092 g pour la zone 59 et 0,035 g pour la zone 61). Ainsi, la sismicité de ces régions peut difficilement être la cause d'un événement extrême. Par ailleurs, comme le montre la table 10, seules les zones 54, 60 et 75 sont capables de d'engendrer des séismes assez puissants pour impacter la centrale nucléaire. Par conséquent, nous considérerons uniquement ces trois régions pour simuler la distribution de *PGA* sur le site de Fessenheim.

4.8 Modélisation de la localisation des séismes

D'après la réglementation et la construction de la carte des régions sismotectoniques françaises, un séisme s'étant produit dans une zone est susceptible de s'y reproduire en tout point de celle-ci avec la même probabilité. D'un point de vue probabiliste, cela revient donc à tirer un point de manière uniforme dans un ensemble Z (Z représentant une zone sismotectonique). Les régions ayant des formes plus ou moins complexes, la méthode de rejet semble adaptée à notre problème.

Principe de la méthode de rejet

À partir de deux réalisations indépendantes d'une variable U uniforme sur $[0, 1]$, il est possible de former deux variables aléatoires V et V' respectivement de loi uniforme sur $[a, b]$ et $[a', b']$ en prenant

$$V := a + (b - a)U$$
$$V' := a' + (b' - a')U$$

Ainsi, le vecteur aléatoire $M = (V, V')$ est de loi uniforme sur le pavé $B = [a, b] \times [a', b']$. Pour générer un tirage uniforme sur un ensemble A contenu dans B, il suffit de tirer séquentiellement des réalisations des vecteurs M_i jusqu'à ce que la condition $M_i \in A$ soit respectée. En notant T, l'indice aléatoire représentant le numéro du premier tirage appartenant à A, le vecteur M_T suit une loi uniforme sur A. Une justification rigoureuse de cette méthode peut être trouvée dans le polycopié de Charles SUQUET, cité dans la bibliographie.

Sous R, nous utiliserons la fonction *spsample* du package *sp*, celle-ci permet de tirer uniformément par la méthode de rejet des coordonnées dans un objet de type *SpatialPolygonsDataframe* (objet contenant un polygone géoréférencée).

4.9 Simulation de l'accélération maximale au sol

Maintenant que nous disposons de tous les éléments, nous sommes en mesure de simuler n années d'événements sismiques et ainsi obtenir une distribution empirique de l'accélération maximale au sol sur le site de Fessenheim.

Le schéma[69] ci-dessous résume les trois grandes étapes de simulation nécessaires à l'implémentation de l'accélération maximale du sol. :

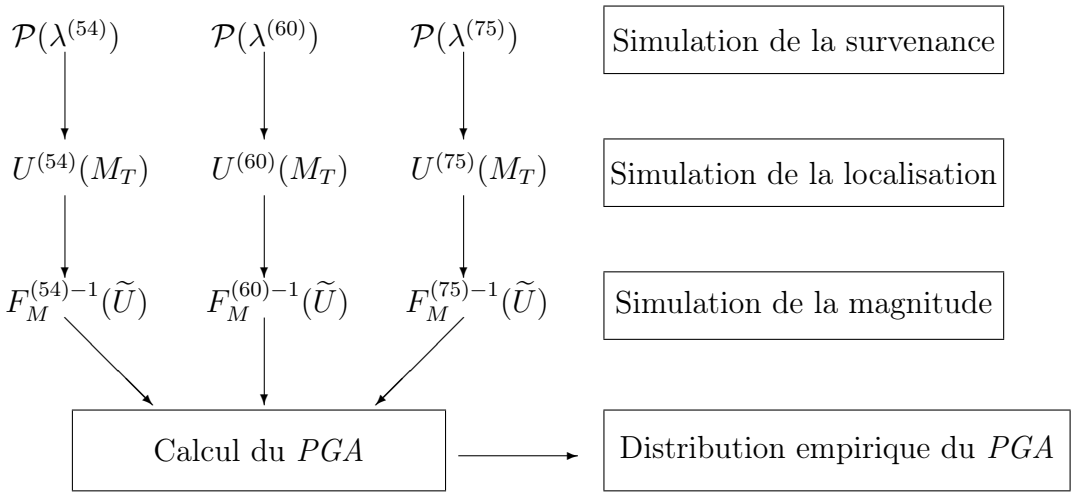


Fig. 26 - Schéma récapitulatif des étapes de simulation pour le calcul du PGA.

Étant donné que nous nous intéressons aux événements rares pouvant impacter le site de Fessenheim, nous simulons 12,5 millions d'années d'accélération maximale du sol. Puis,

69. $U^{(Z)}(M_T)$ représente la loi uniforme sur l'ensemble Z (Z symbolisant une région sismotectonique).

en extrayant pour chaque année la valeur maximale, nous construisons une distribution empirique du maximum annuel du *PGA* sur le site de Fessenheim.

5 Analyse des résultats

Dans cette section, nous allons nous livrer à une première analyse de la distribution empirique obtenue. En proposant une vue d'ensemble des résultats, nous verrons notamment que la période de retour associée au seuil de résistance théorique [70] de 0,34 g est très haute. Puis, afin de juger la cohérence de nos résultats, nous les comparerons avec trois autres études de l'aléa sismique réalisées en France.

5.1 Vue d'ensemble des résultats

Comme l'illustre la figure 27 ci-dessous, la distribution empirique du *PGA* a une queue très lourde. Sur le graphique de droite nous pouvons remarquer que le quantile 99,5% est à un niveau très bas (0,089 g) comparé au seuil de résistance théorique de 0,34 g environ. Ceci montre clairement que nous avons ici à faire à des événements bien plus extrêmes encore qu'au sens Solvabilité 2. Dans le sens où, d'après la distribution obtenue, un événement sismique "bicentenaire" n'engendrerait vraisemblablement pas d'accident nucléaire sur le site de Fessenheim.

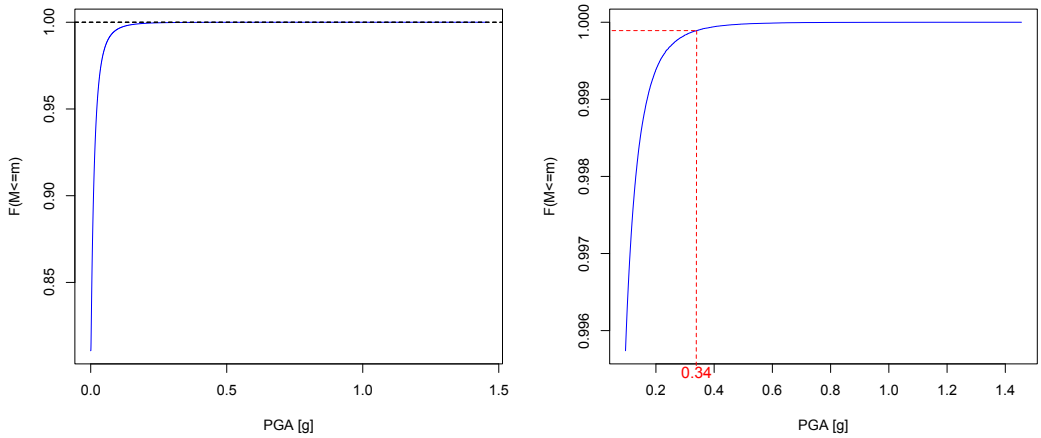


Fig. 27 - À gauche : Fonction de répartition empirique complète du *PGA* ; À droite : Fonction de répartition empirique du *PGA* à partir du quantile 99,5%. Distribution obtenue à partir de 12,5 millions d'années simulées.

La table 11 ci-dessous, donne le *PGA* en fonction de différentes périodes de retours. Celle-ci met également en avant le caractère "très" rare d'une potentielle catastrophe nucléaire consécutivement à un séisme :

70. Voir table 5.

Période de retour (en année)	PGA g
10	0,0102
20	0,0224
50	0,0433
100	0,0637
200	0,0890
475	0,1283
1000	0,1699
2000	0,2140
5000	0,2850
9232	**0,34**
10000	0,3478
25000	0,4397
50000	0,5165

Tab. 11 - Valeur de *PGA* en fonction de différentes périodes de retours.

D'après les résultats obtenus, la période de retour d'un tremblement de terre pouvant générer une accélération maximale du sol, au moins égale au seuil de résistance théorique est de l'ordre de 9232 années (soit une fréquence annuelle de $1,083\,10^{-4}$).

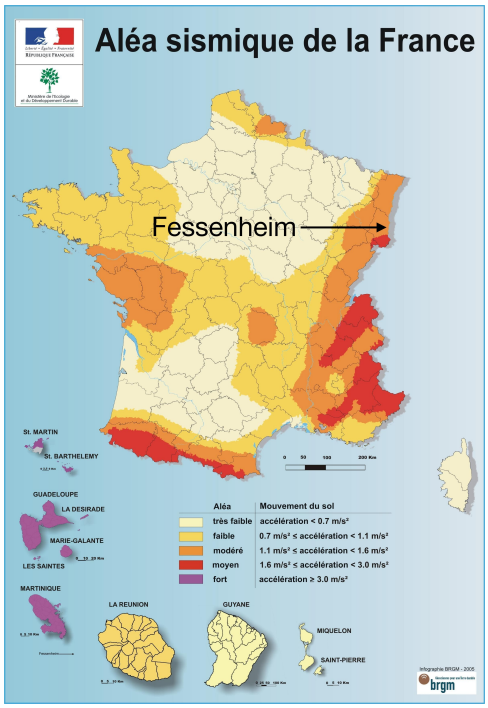
5.2 *Benchmark* des résultats

De par la confidentialité régnant dans le domaine du nucléaire, peu d'études quantitatives sont accessibles au grand public. Ainsi, nous ne pouvons pas réellement confronter la valeur de *PGA* du seuil de résistance modélisée et sa période de retour associée avec des valeurs officielles. Néanmoins, afin de tester la cohérence de notre modèle, nous disposons de quelques ressources d'information accessible librement. En effet, dans un premier temps il est possible de comparer la valeur de *PGA* obtenue pour une période de retour de 475 ans avec les cartes d'aléa sismique existantes. Notons que la période de retour de 475 ans (précisément 474,6 ans) correspond en fait à une probabilité d'excès de 10% sur une période de 50 ans. 50 ans étant la durée de vie moyenne admise d'un bâtiment ordinaire par l'eurocode 8 [71]. Ainsi, par convention la plupart des cartes d'aléa sismiques sont représentée sur cette base. Pour confronter la distribution de notre modèle, nous avons retenu ces trois références distinctes :

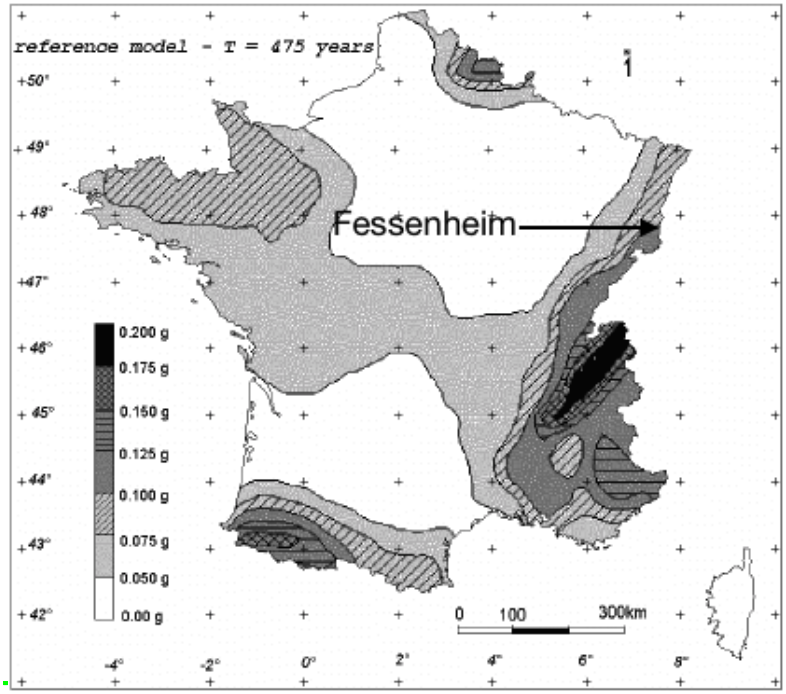
- La carte officielle du zonage sismique en France (1) ;
- L'étude de l'aléa sismique réalisée dans DOMINIQUE et ANDRE [2012] (2) ;
- La carte d'aléa sismique créée à partir du catalogue SHARE [72] (celui utilisé dans notre étude) (3).

71. L'eurocode 8 est une directive européenne traitant des règles de construction en matière de résistance aux séismes.
72. Le lecteur intéressé peut consulter cette carte en haute résolution à l'adresse suivante : http://www.share-eu.org/node/90

(1)



(2)



(3)

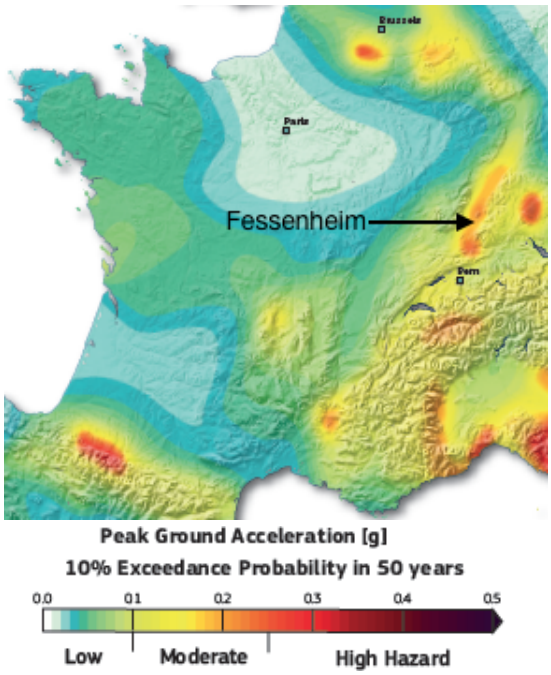


Fig. 28 - (1) : Carte officielle de l'aléa sismique de la France ; (2) : Carte de l'aléa sismique réalisée dans DOMINIQUE et ANDRE [2012] ; (3) : Extrait de la carte d'aléa sismique créee à partir du catalogue SHARE.

La table ci-dessous regroupe les différentes valeurs de PGA en fonction des documents de référence [73] présentés ci-dessus :

73. Pour la référence (2) une conversion des m/s² en g est effectuée (9,81 m/s² ≈ 1 g).

Référence	PGA g
(1)	[0,112 ; 0,163]
(2)	[0,075 ; 0,100]
(3)	[0,150 ; 0,210]
PGA modélisé	$\approx$ 0,128

Tab. 12 - Table comparative du *PGA* pour une période de retour de 475 ans.

Nous pouvons constater que l'écart entre les trois références est assez important. La deuxième se situe cependant nettement en dessous des deux autres. Cette différence entre les trois études illustre parfaitement la difficulté qu'est la modélisation de l'aléa sismique. Concernant l'évaluation du *PGA* par notre modèle, nous sommes dans les bornes de *PGA* de la carte officielle française. En revanche, même s'il est difficile de repérer avec précision la valeur de *PGA* de la carte (3), notre valeur de *PGA* semble plus faible que celle produite avec le catalogue SHARE[74]. Le fait que le *PGA* modélisé pour la période de 475 ans soit dans les bornes de la carte officielle rassure donc sur la cohérence de notre modèle, même si, nous avons seulement pu tester un point en particulier de la distribution.

Un autre moyen de tester la cohérence de la distribution modélisée peut être trouvé sur le site internet de la WNA[75]. D'après leur site internet, une centrale doit être capable de résister à une sollicitation deux fois plus grande que celle de l'événement millénaire (période de retour de 1000 ans). Or, dans notre modélisation la valeur de *PGA* correspondant à une période de retour de 1000 ans est de 0,1699 pour un seuil de résistance de 0,34 g. Nous retrouvons donc bien le même rapport de deux entre la période de retour 1000 ans et le seuil de résistance théorique.

6 Modélisation de la queue de distribution du *PGA*

Étant donné que nous nous préoccupons ici des événements rares susceptibles d'engendrer une catastrophe nucléaire et d'impacter l'assureur, nous allons concentrer nos efforts sur la modélisation de la queue de distribution du *PGA*. Pour ce faire, nous allons adopter une approche basée sur la théorie des valeurs extrêmes. Plus précisément, nous nous intéresserons aux dépassements de seuil à travers la distribution de Pareto généralisée (*GPD*[76]). Sous réserve d'un seuil correctement choisi, la *GPD* permet de modéliser de manière précise le comportement d'une distribution empirique au-delà de ce seuil (la distribution des excès).

Ensuite, la *GPD* obtenue nous permettra de resimuler de nouvelles valeurs de *PGA*. Celles-ci seront utilisées pour calibrer des classes de coûts potentiels conditionnelles aux dépassements de seuil. De plus, nous utiliserons la *GPD* afin de comparer la période de retour obtenue empiriquement de 9232 ans correspondant au *PGA* du seuil de résistance. De fait, en s'intéressant non pas à la totalité de la distribution, mais uniquement aux comportements de la queue, celle-ci offre un cadre statistique idéal pour l'estimation de quantiles d'ordre élevé

74. À noter que même si la base de données est en accès libre, aucune information n'est donnée au sujet de la modélisation de l'aléa sismique.
75. World Nuclear Association : http://www.world-nuclear.org.
76. *GPD* : *Generalized Pareto Distribution.*

Avant de calibrer une *GPD* à notre distribution de *PGA*, nous rappelons ici les principes de la théorie des valeurs extrêmes [77] que nous utiliserons dans la suite. Afin d'éviter toute confusion, précisons que dans ce qui suit lorsque nous évoquerons la notion de seuil, celle-ci n'est pas liée au seuil de résistance théorique dont nous parlions précédemment, mais uniquement liée à la théorie des valeurs extrêmes.

6.1 Éléments théoriques sur les dépassements de seuil

6.1.1 Distribution de Pareto généralisée

Pour un échantillon $X_1, \ldots, X_n$ donné, s'intéresser aux dépassements d'un seuil u revient à considérer les observations X_i strictement positives tels que

$$(X_i - u)_+$$

Ces observations étant caractérisées par la distribution de Pareto généralisée.

Définition 1 *La distribution GPD(β,ξ) est définie par*

$$G^p_{\xi,\beta}(x) = \begin{cases} 1 - [1 + \xi(x/\beta)]^{-1/\xi} & si\ \xi \neq 0, \\ 1 - e^{-x/\beta} & si\ \xi = 0. \end{cases}$$

Sa densité s'écrit

$$g^p_{\xi,\beta}(x) = \begin{cases} \beta^{\frac{1}{\xi}}(\beta + \xi x)^{-\frac{1}{\xi}-1} & si\ \xi \neq 0, \\ \beta^{-1}e^{-x/\beta} & si\ \xi = 0. \end{cases} \tag{23}$$

avec

$$\begin{aligned} x &\geq 0 \quad si\ \xi \geq 0 \\ 0 \leq x &< -\beta/\xi \quad si\ \xi \leq 0 \end{aligned}$$

Le paramètre ξ [78] est appelé paramètre de forme ou indice de queue et $\beta > 0$ le paramètre d'échelle.

En pratique, pour modéliser une *GPD*, le seuil u devra être choisi harmonieusement entre :

- Un seuil suffisamment grand pour capturer uniquement le comportement de la queue et que l'ajustement par une *GPD* soit bon ;
- Un seuil relativement petit pour disposer d'un nombre de données convenable permettant d'obtenir une estimation robuste des paramètres de la *GPD*.

77. Les principes énoncés ici sont inspirés des supports de cours de l'ISFA de Frédéric PLANCHET et de Christian ROBERT (voir la bibliographie).

78. Pour un échantillon donné, l'indice de queue ξ de la *GPD* est équivalent à celui de la distribution *GEV* (*Generalized Extreme Value*). Cette relation entre *GPD* et *GEV* est une conséquence du théorème de Pickands-Balkema-de Haan. Pour plus de détails, le lecteur intéressé peut consulter PICKANDS [1975] à ce sujet. Lorsque $\xi > 0$ la queue de distribution est épaisse ce qui correspond au domaine d'attraction de Fréchet pour la loi du maximum.

Les propriétés suivantes, données dans EMBRECHTS *et al.* [1997], sont valables pour une variable aléatoire X suivant une GPD(β,ξ)

Propriété 1 *La variable aléatoire X admet des moments jusqu'à l'ordre $\left[\xi^{-1}\right]$ et*

$$\mathbb{E}\left[X^r\right] = \frac{\beta^r \Gamma(\xi^{-1} - r)}{\xi^{r+1}\Gamma(\xi^{-1}+1)}, \; si \; r \leq \left[\xi^{-1}\right]$$

En particulier pour le moment d'ordre 1

$$\mathbb{E}(X) = \frac{\beta}{1-\xi}$$

Propriété 2 *(Stabilité) La variable aléatoire $X_u = \left[X - u \mid X > u\right]$ suit une loi GPD(ξ,$\beta + \xi u$). Si $\xi < 1$ alors*

$$\mathbb{E}\left[X - u \mid X > u\right] = \frac{\beta + \xi u}{1-\xi}, \quad pour \; \beta + \xi u > 0$$

6.1.2 Estimation des paramètres par EMV

En reprenant la densité de la distribution donnée à l'équation (23) la log-vraisemblance du modèle s'écrit

$$l(\xi, \beta; X_1, \ldots, X_n) = -n\ln(\beta) - (1 + \frac{1}{\xi})\sum_{i=1}^{n} \ln(1 + \frac{\xi}{\beta}X_i)$$

En posant $\tau = \xi/\beta$, la maximisation de la log-vraisemblance amène à résoudre le système suivant

$$\begin{cases} \xi & = n^{-1}\sum_{i=1}^{n}\ln(1+\tau X_i) = \hat{\xi}(\tau) \\ \tau^{-1} & = n^{-1}(1+\xi^{-1})\sum_{i=1}^{n}\frac{X_i}{1+\tau X_i} \end{cases} \tag{24}$$

Finalement, l'estimateur du maximum de vraisemblance de (ξ, τ) est $(\hat{\xi} = \hat{\xi}(\hat{\tau}), \hat{\tau})$ avec $\hat{\tau}$ la solution de

$$\tau^{-1} = n^{-1}(1 + \hat{\xi}^{-1}(\tau))\sum_{i=1}^{n}\frac{X_i}{1+\tau X_i}$$

L'équation précédente se résout numériquement [79] par une méthode itérative, sous condition que l'initialisation soit relativement proche de la valeur réelle de τ. En pratique, nous utiliserons sous R le package *evir* et la fonction *gpd* pour résoudre le système d'équation (24). Cette fonction prend deux paramètres : un jeu de données sur lequel ajuster une *GPD* et la valeur du seuil à partir duquel modéliser la distribution des excès.

En revanche, cette procédure ne détermine pas de manière automatique le seuil à retenir.

79. Par un exemple avec un algorithme de type Newton-Raphson.

6.1.3 Détermination du seuil

Diverses méthodes plus ou moins complexes existent pour sélectionner un seuil approprié. Dans notre étude, nous avons retenu une approche basée sur la fonction moyenne des excès (MEF [80]).

La propriété de stabilité (proriété 2) de la *GPD* signifie que si la *GPD* est un modèle valide pour un seuil fixé u_0, alors elle est valide pour tout autre seuil u tel que $u > u_0$. En désignant par $\beta(u_0)$ le paramètre d'échelle de la *GPD* au-delà de u_0, l'espérance des excès de seuil conditionnellement au fait d'être supérieur au seuil est

$$\begin{aligned} MEF(u) &= \mathbb{E}\big[X - u \mid X > u\big] \\ &= \frac{\beta(u_0) + \xi u}{1 - \xi} \\ &= \frac{\beta(u_0)}{1-\xi} + \frac{\xi}{1-\xi} u, \quad \text{pour } \xi < 1 \end{aligned}$$

Ainsi, nous pouvons remarquer que la *MEF* est une fonction affine de u. Cette propriété de linéarité de la *MEF* est une caractéristique propre de la classe des *GPD*. Si le choix du seuil u_0 est bon, alors les espérances des excès pour des seuils plus élevés seront alignées sur droite de pente $\frac{\xi}{1-\xi}$. Par conséquent, nous avons à notre disposition un moyen empirique simple de détermination du seuil.

Le seuil à retenir sera donc la plus petite valeur de u à partir de laquelle la *MEF* est approximativement linéaire. En pratique, ce seuil peut se détecter de manière visuelle sur un graphique appelé *Mean Excess Plot* représentant $MEF(u)$ en fonction de u.

6.1.4 Estimation d'un quantile d'ordre élevé

Il a été montré dans ROOTZÉN et TAJVIDI [1997] que pour un quantile d'ordre p et pour un seuil fixé u quelconque tel que $x_p > u$, que x_p peut être approché par

$$\hat{x}_p = u + G^{-1}_{\hat{\xi},\hat{\beta}}(x)\left(\frac{p - F_n(u)}{1 - F_n(u)}\right) = \begin{cases} u + \dfrac{\hat{\beta}}{\hat{\xi}}\left[\left(\dfrac{1-p}{1-F_n(u)}\right)^{-\hat{\xi}} - 1\right] & \text{si } \hat{\xi} \neq 0 \\ u - \hat{\beta}\ln\left(\dfrac{1-p}{1-F_n(u)}\right) & \text{si } \hat{\xi} = 0 \end{cases} \tag{25}$$

Où $F_n(u)$ désigne la fonction de répartition empirique en u de l'échantillon d'origine $X_1, \ldots, X_n$:

$$F_n(u) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} 1_{\{X_i \leq u\}}$$

En posant $N(u)$ le nombre de dépassements du seuil u, la fonction de survie empirique au point u à pour expression

$$S_n(u) = \frac{N(u)}{n}$$

80. *Mean Excess Function.*

Par suite,

$$1 - F_n(u) = S_n(u) = \frac{N(u)}{n}$$

Finalement, pour $p > 1 - \frac{N(u)}{n}$, l'équation (25) devient

$$\hat{x}_p = \begin{cases} u + \dfrac{\hat{\beta}}{\hat{\xi}}\left[\left(\dfrac{n}{N(u)}(1-p)\right)^{-\hat{\xi}} - 1\right] & \text{si } \hat{\xi} \neq 0 \\ u - \hat{\beta}\ln\left(\dfrac{n}{N(u)}(1-p)\right) & \text{si } \hat{\xi} = 0 \end{cases} \tag{26}$$

Ainsi, une fois les paramètres de la *GPD* ajustés sur la distribution des dépassements de seuil, ces dernières équations fournissent un moyen pratique d'estimation d'un quantile extrême, du moins supérieur au seuil u fixé.

6.2 Application à la distribution du *PGA*

Dans cette section nous présentons l'ajustement *GPD* réalisé sur les données de *PGA* simulés.

6.2.1 Sélection du seuil et ajustement de la *GPD*

La première étape de la modélisation consiste à prédéterminer visuellement un seuil à partir duquel modéliser une *GPD*. Pour y parvenir, nous utilisons la méthode évoqué au 6.1.3 en traçant le *Mean Excess plot*.

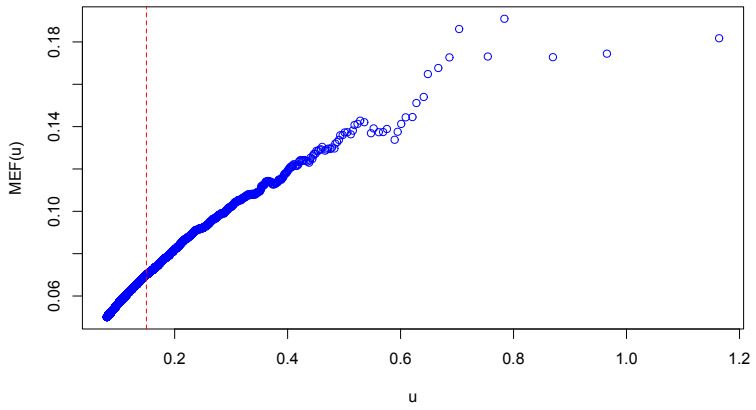


Fig. 29 - *Mean Excess Plot* de la distribution de *PGA*. La droite verticale rouge montre l'approximation visuelle du seuil à choisir.

Comme le montre la figure 29 ci-dessus, la *MEF* devient à peu près linéaire à partir de 0,15. le *Mean Excess Plot* suggère donc un seuil dans ses alentours. Par conséquent, dans notre situation le seuil naturel semble se situer dans un voisinage assez proche de 0,15.

Pour affiner cette première estimation, nous avons créé une procédure, qui à seuil donné, estime les paramètres ξ et β d'une *GPD* en renvoyant la statistique et la *p-value*

du test de Cramér-Von Mises[81]. Finalement, nous retiendrons le seuil pour lequel la statistique du test est minimale.

Pour ce faire, nous appliquons notre procédure à un vecteur contenant des seuils dans l'intervalle $[0,1;0,2]$ avec un pas de 0,001. Les résultats[82] pour le seuil retenu sont les suivants :

u	$N(u)$	*p-value*	Statistique du test	$\hat{\beta}$	$\hat{\xi}$
0,142	20218	0,472	0,055	0,055	0,189

Tab. 13 - Résultat de la procédure pour le seuil retenu : $u = 0,142$.

Enfin, pour illustrer les résultats de la procédure, nous traçons la statistique du test en fonction du seuil.

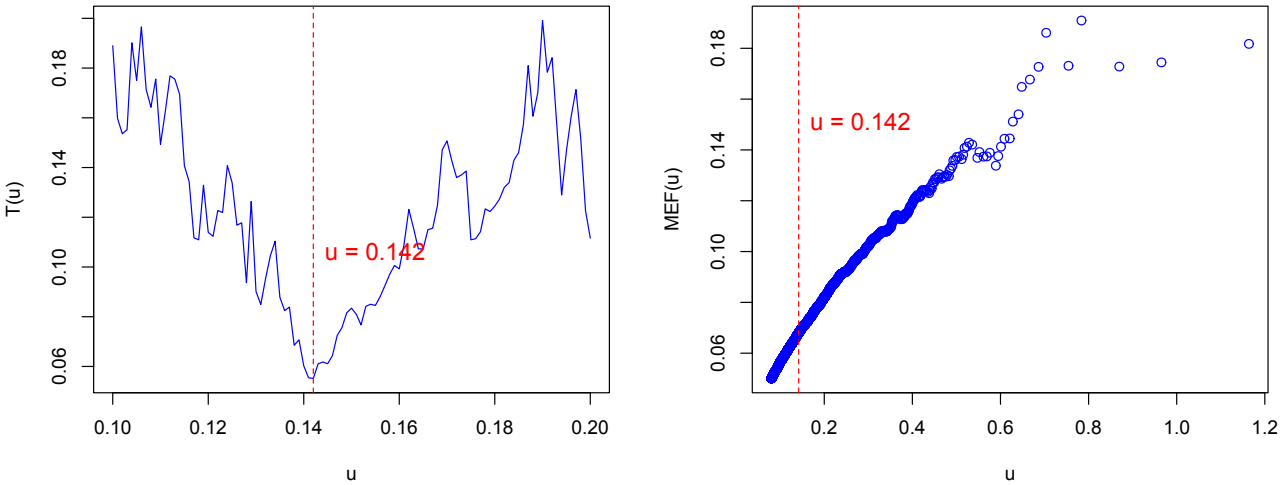


Fig. 30 - À gauche : Évolution de la statistique du test en fonction du seuil. $u \in [0,1;0,2]$; À droite : *Mean Excess Plot*, la droite vertical rouge montre le seuil retenu par la procédure.

La procédure nous a permis d'affiner notre première estimation par un critère objectif. l'ajustement par une *GPD* pour un seuil de 0,142 semble bien capter le comportement de la queue de distribution du *PGA*. En effet, la statistique du test étant petite et la *p-value* élevée, cela montre que la fonction de répartition empirique du *PGA* et celle de la *GPD* sont proches. De plus, la valeur de $\hat{\xi}$ ($\approx 0,19$) vient confirmer la remarque faite au 5.1 sur l'épaisseur de la queue de distribution du *PGA*. Notons également, que l'ajustement par une *GPD* se fait sur seulement 20218 valeurs, soit 0,16% de la distribution d'origine. Autrement dit, il y a 0,16% de chance par an d'observer un *PGA* excédant 0,142 g sur le site de Fessenheim. Par conséquent, l'occurrence d'un dépassement de seuil peut être vu comme événement survenant selon une loi de Bernoulli[83] de paramètre 0,0016.

Pour illustrer la qualité de l'ajustement réalisé par la *GPD*, nous pouvons tracer la fonction de répartition empirique des excès avec celle de la *GPD*.

81. Voir 4.3.4 pour plus d'information sur le test de Cramér-Von Mises.
82. Une partie de la table des résultats de la procédure est donnée à l'annexe F.
83. Cette loi sera utilisée dans la section 7.2.1 pour la création du générateur de perte.

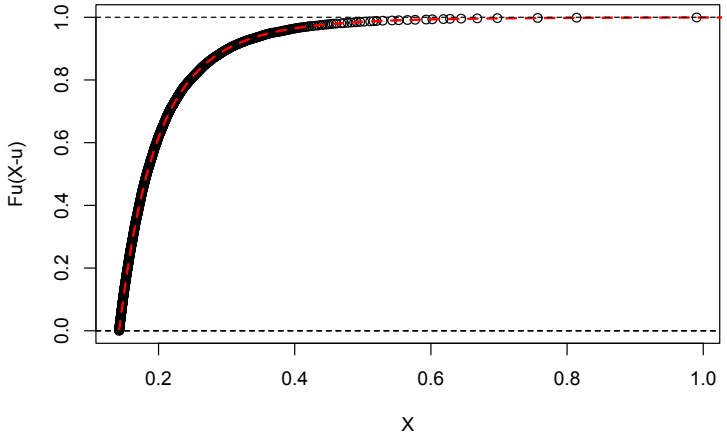


Fig. 31 - Adéquation de la *GPD* à la fonction de répartition empirique des excès

La figure 31 montre que pour un seuil u de 0,142 g l'ajustement réalisée par la *GPD* est bon. Ainsi, pour approcher la distribution conditionnelle de dépassement de seuil $F_u(x-u)$ telle que $F_u(x-u) = \mathbb{P}(X \leq x \mid X > u)$, nous retenons la loi GPD de paramètres $\hat{\xi} = 0,189$ et $\hat{\beta} = 0,055$. Plus précisément, nous avons

$$\hat{F}_u(x-u) \approx G_{\hat{\xi},\hat{\beta}}(x) = 1 - \left[1 + \frac{\hat{\xi}}{\hat{\beta}}(x-u)\right]^{-1/\hat{\xi}} \tag{27}$$

Dorénavant, grâce à l'ajustement réalisé, nous disposons d'une loi pour simuler des événements en se concentrant uniquement sur la queue de distribution du *PGA*, et donc, sur les événements extrêmes qui pourraient entraîner une défaillance voir une catastrophe nucléaire sur le site de Fessenheim. Cette distribution constituera la base sur laquelle nous reposerons la construction de classe de dommages potentiels.

6.2.2 Estimation de la période de retour du seuil de résistance théorique de Fessenheim

À la différence d'un cas classique en assurance où l'on s'intéresse à l'estimation de la $VAR_{99,5\%}$, nous souhaitons ici connaître la période de retour associée à la valeur de *PGA* déterminant le seuil de résistance théorique. Pour éviter toute confusion avec le seuil u de la *GPD*, nous notons u_F le seuil de résistance théorique.

En reprenant l'équation (26) et les paramètres de la *GPD* déterminée au 6.2.1, nous pouvons obtenir une estimation de la période de retour du seuil de résistance théorique (0,34 g). D'après l'équation (26) pour $\xi \neq 0$

$$\hat{x}_p = u + \frac{\hat{\beta}}{\hat{\xi}}\left[\left(\frac{n}{N(u)}(1-p)\right)^{-\hat{\xi}} - 1\right]$$

En inversant le membre de droite de l'équation précédente nous obtenons

$$\hat{p} = 1 - \frac{N(u)}{n}\left[1 + \frac{\hat{\xi}}{\hat{\beta}}(x_p - u)\right]^{-\frac{1}{\hat{\xi}}}$$

En notant $\hat{RP}_{u_F}$ l'estimation de la période de retour du seuil de résistance théorique du site de Fessenheim, nous avons

$$\hat{RP}_{u_F} = \frac{1}{1 - \hat{p}_{U_F}}$$

Ainsi, pour $x_p = u_F = 0,34$, nous obtenons une période de retour de 9557 ans avec l'approximation $G_{\hat{\xi},\hat{\beta}}(x)$ de la queue de distribution. En d'autres termes, la probabilité annuelle d'observer une accélération maximale du sol d'au moins 0,34 g sur le site de Fessenheim est de l'ordre de 1.046×10^{-4}. Nous obtenons une période de retour légèrement au-dessus que celle trouvée empiriquement (9232 ans). Ce résultat n'est pas surprenant étant donné que la *GPD* réplique bien la queue de distribution.

7 Modélisation du coût économique

En génie nucléaire, l'évaluation probabiliste du risque sismique repose essentiellement sur les courbes de fragilité. Celles-ci sont traditionnellement utilisées pour mesurer le risque de défaillance des centrales nucléaires, notamment, pour des infrastructures critiques, comme la cuve d'un réacteur. Classiquement, une courbe de fragilité [84] sismique est une fonction de répartition log-normale donnant la probabilité de défaillance ou d'endommagement en fonction du *PGA*, et ce, pour chaque élément du site nucléaire. En plus de compétences poussées en génie nucléaire dont nous ne disposons pas, la calibration de ces courbes de fragilité nécessite une connaissance accrue de la structure de la centrale. Bien sûr, pour des raisons de sécurité ces informations sont confidentielles. Ainsi, nous sommes contraints de trouver une solution alternative à l'aide d'hypothèses simplificatrices afin d'estimer la vulnérabilité du site de Fessenheim aux tremblements de terre.

7.1 Construction de classes de dommages potentiels

À défaut d'autres informations sur les propriétés intrinsèques de la centrale, nous nous sommes basé sur un rapport [85] de l'IAEA [86] concernant la vulnérabilité des centrales nucléaires. Dans celui-ci, figure un exemple d'une segmentation du *PGA* en classes de dommages pour une centrale nucléaire dont la conception prévoit un seuil de résistance de 0,25 g. Le découpage [87] effectué est le suivant :

- <0,05 : aucun dommage (1) ;
- 0,05 - 0,15 : potentielle défaillance des composants et des systèmes non prévus pour résister à un séisme (2) ;
- 0,15 - 0,30 : potentielle défaillance des composants et des systèmes non prévus pour résister à un séisme ; faible chance de défaillance des composants et des systèmes prévus pour résister à un séisme (3) ;
- 0,3 - 0,5 : défaillance générale des composants et des systèmes non prévus pour résister à un séisme ; potentielle défaillance des composants et des système prévus pour résister à un séisme (4) ;

84. Voir ZENTNER *et al.* [2008] pour plus d'information sur les courbes de fragilité.
85. Le lien vers le rapport de l'IAEA est donné en annexe.
86. International Atomic Energy Agency.
87. Les intervalles de *PGA* sont donnés en g.

- 0,5 - 0,75 : défaillance sévère des composants et des systèmes non prévus pour résister à un séisme ; défaillance générale des composants et des systèmes prévus pour résister à un séisme (défaillance du système de refroidissement des réacteurs) (5) ;
- >0,75 : dommage sévère à la plupart des systèmes et des composants (6).

En adaptant de manière proportionelle ces classes par rapport au seuil de résistance théorique de 0,34 g de Fessenheim, nous construisons une segmentation de la queue de distribution du *PGA* modélisée par la loi *GPD* de l'équation (27). Afin de clarifier la transposition effectuée, donnons l'exemple pour la classe (6) :

- Étape 1 : nous commençons par calculer le ratio $\frac{0,75}{0,25}$; nous obtenons un ratio de 3 ; la borne inférieure de la classe (6) est donc trois fois supérieure à la valeur de conception de 0,25 g ;
- Étape 2 : nous appliquons le ratio obtenu à la valeur de conception théorique de Fessenheim (0,34 g) pour créer la borne inférieure de la classe (6) ; nous calculons donc la quantité $3 \times 0,34$; finalement, nous obtenons une borne de 1,02 g.

La table ci-dessous présente la segmentation réalisée à partir de la méthodologie précédente :

Classes de dommages	PGA [g]
(1)	<0,068
(2)	0,068 - 0,204
(3)	0,204 - 0,408
(4)	0,408 - 0,680
(5)	0,680 - 1,020
(6)	>1,020

Tab. 14 - Découpage en classes de dommages obtenu à partir de l'exemple de l'IAEA. Les numéros correspondent aux classes de risque ci-dessus.

Cependant, la modélisation de la queue de distribution par la *GPD* est valable à partir du seuil de 0,142, nous ne pouvons donc pas tenir compte de la classe (1). S'agissant de la classe "sans dommage", et étant donné que nous nous intéressons aux événements les plus extrêmes, cette perte d'information n'a pas de réelle conséquence sur la création des classes.

Classes de dommages	PGA [g]
(2)	<0,204
(3)	0,204 - 0,408
(4)	0,408 - 0,680
(5)	0,680 - 1,020
(6)	>1,020

Tab. 15 - Découpage en classes de dommages après le retrait de la classe (1).

Néanmoins, l'exemple reste très vague quant au type d'accident pouvant survenir dans chaque classe. Il reste donc à poser des hypothèses afin d'attribuer à chacune d'elles des scénarios probables. Pour ce faire, nous nous baserons principalement sur la segmentation de l'IAEA et un rapport concernant l'estimation du coût économique d'un accident majeur en France réalisé par l'IRSN. Nous nous appuierons également sur l'historique des accidents nucléaires, en particulier, les quelques cas répertoriés de séismes ayant affectés des centrales nucléaires. En étudiant les conséquences de ces événements, nous essaierons de dégager une tendance puis d'en extraire des scénarios afin de les affecter aux classes de dommages de la table 15. Afin de déterminer un intervalle de coût potentiel pour chaque classe, nous utiliserons les travaux de SOVACOOL [2008] compilant les accidents et les coûts [88] du secteur de l'énergie et en particulier celui du nucléaire entre 1907 et 2007. Dans la suite, sauf mention du contraire les coûts présentés proviendront de cette article. Par ailleurs, par manque d'historique au sujet d'évènements sismiques impactant l'industrie nucléaire, nous faisons l'hypothèse que leurs conséquences peuvent être assimilées à d'autres accidents de sources différentes. De façon plus précise, nous utiliserons des sinistres dont la cause n'est pas nécessairement liée à un tremblement de terre.

7.1.1 Scénarios extrêmes des classes (5) et (6)

Officiellement, une seule catastrophe nucléaire (de niveau 7 sur l'échelle INES [89]) est dû à un tremblement de terre, celle de Fukushima (2011). Encore que cette accident majeur n'est pas lié de manière directe au tremblement de terre. En effet, celui-ci résulte du tsunami généré par le séisme et non pas directement de la secousse. Par conséquent, nous disposons d'aucune observation directe d'accident majeur ou d'accident grave consécutif à un tremblement de terre sur lequel se reposer. La différenciation entre accident majeur et accident grave provient de la distinction faite entre ces derniers sur l'échelle INES.

Pour rappel l'échelle INES répertorie et classe les incidents/accidents nucléaires selon 8 niveaux de 0 à 7. En particulier, l'accident grave correspond au niveau 6 et l'accident majeur au niveau de 7 de l'échelle. l'IRSN [90] en donne la description suivante :

- Accident grave (niveau 6) : rejet important de matières radioactives. Un cas :
  - Kyshtym (URSS 1957) : explosion chimique d'une cuve de stockage de déchets de haute activité se produit dans une usine de retraitement. Plusieurs villages ont dû être abandonnés. Caché pendant plusieurs années au reste du monde et même à la population locale pendant la première année suivant la catastrophe, son coût reste un mystère. Cependant, au vu de la gravité de l'accident celui-ci excède sûrement des dizaines de milliards d'euros.
- Accident majeur (niveau 7) : rejet majeur de matières radioactives avec des effets considérables sur la santé et l'environnement. Deux cas recensés :
  - Tchernobyl (Ukraine 1986) : un essai incontrôlé a conduit à la destruction du réacteur et à la dispersion dans l'atmosphère du combustible. La contamination s'est étendue à toute l'Europe. Sont coût économique constamment revu à la hausse depuis 1981 se situerait Entre 285 et 475 milliards d'euros sur 30 ans d'après l'IRSN [91],

88. Les coûts étant donnés en dollar américain, nous les avons redressés de l'inflation avant d'appliquer le taux de change Euro-Dollar du 1er janvier 2017 (1 EUR = 1,05310 USD).
89. L'échelle INES est donnée à l'annexe C.
90. Source : Classification accident nucléaire IRSN.
91. Source : Dossier Tchernobyl IRSN.

- Fukushima (Japon 2011) : voir ci-dessus. Son coût avoisinerait 170 milliards d'euros fin 2016 d'après les autorités japonaises.

Les évènements listés ci-dessus constituent les trois catastrophes les plus importantes de l'histoire de l'industrie nucléaire civile. De plus, leurs conséquences semblent compatibles avec la description faite par l'IAEA des classes (5) et (6) :

- Classe (5) : défaillance sévère des composants et des systèmes non prévus pour résister à un séisme ; défaillance générale des composants et des systèmes prévus pour résister à un séisme (défaillance du système de refroidissement des réacteurs) ;
- Classe (6) : dommages sévères sur la plupart des systèmes et des composants pour un *PGA* au moins trois fois supérieur au seuil de conception.

Même si cette description est sujette à interprétation, nous considérons que ces dommages peuvent occasionner un accident grave ou majeur sur le site de Fessenheim. Pour atteindre la classe (5), un *PGA* au moins deux fois plus grand que la valeur de conception du site est nécessaire, soit une période de retour de 155 320 ans. Cela paraît donc une hypothèse crédible que d'assimiler la classe (5) à un accident grave. De même, la dernière classe évoquant des dommages sévères à l'ensemble de la centrale, nous pouvons envisager un accident majeur avec des rejets massifs de matières radioactives dans l'environnement.

Pour affecter à ces classes des coûts économiques probables, nous nous basons sur un rapport [92] publié par l'IRSN en 2013 suite au tragique accident de Fukushima. Dans ce document, l'IRSN fournit une évaluation du coût économique que pourrait engendrer un accident de niveau 6 et 7 en France de type Fukushima ou Tchernobyl. La figure 32 ci-dessous montre les coûts médians de l'étude :

		Accident grave	Accident majeur
Coûts sur site	Réhabilitation	5	5
	Remplacement	6	9
	Autres coûts sur site	ε	ε
	TOTAL	**10**	**15**
Coûts des territoires contaminés	Zones d'exclusion	ε	13
	Zones de contrôles radiologiques	11	98
	TOTAL (arrondi)	**11**	**110**
Coûts radiologiques hors site	Contremesures d'urgence	ε	3
	Effets sanitaires	ε	10
	Effets psychologiques	0	17
	Pertes agricoles	9	14
	Coût de relogement	0	10
	TOTAL	**9**	**54**
Coûts d'image	Réduction de la demande de produits agricoles français	13	60
	Réduction de la demande touristique	25	75
	Réduction des autres exportations	12	46
	TOTAL (arrondi)	**50**	**180**
Effets sur le parc de production d'électricité		**44**	**88**
TOTAL (arrondi)		**120**	**450**

ε signifie un coût faible, en valeur relative seulement : inférieur à 1 milliard d'euros

Fig. 32 - Estimation des coûts médians d'un accident nucléaire de niveau 6 et 7 en France : Source IRSN.

92. Source : Estimation coût accident de niveau 6 et 7 IRSN.

En outre, l'IRSN précise que pour chaque famille les coûts médians peuvent varier de -50% à +100% de par la variabilité de la modélisation des rejets. Les conséquences des rejets radioactifs dépendant fortement de la météo ce résultat paraît donc logique. L'IRSN donne ainsi les tranches de coût suivantes pour l'année 2013 :

- Accident grave : 50 à 250 milliards d'euros ;
- Accident majeur : 200 à 1000 milliards d'euros

En corrigeant ces coûts de l'inflation de l'euro sur la période 2013-2016, nous obtenons une tranche allant de 51 à 253 milliards d'euros pour l'accident grave et de 202 à 1012 milliards d'euros pour l'accident majeur.

La table ci-dessous résume les caractéristiques que nous avons assignées aux classes (5) et (6). Les périodes de retour données correspondent à celles de la *GPD* modélisée dans la partie précédente (équation 27).

Classe	PGA [g]	Période de retour modélisée (*en année*)	Coût (*en Mrd€*)	Conséquences potentielles
(5)	0,68 à 1,02	155320 à 955390	[51 ; 253]	Accident grave (INES 6)
(6)	>1,02	>955390	[202 ; 1012]	Accident majeur (INES 7)

Tab. 16 - Classes (5) et (6) : Scénarios et intervalles de coût.

7.1.2 Scénarios de la classe (4)

Pour associer une tranche de coût à la classe (4), nous nous sommes inspiré des incidents de Kashiwazaki Kariwa (Japon 2007) et de Three Mile Island (USA 1979).

Le premier événement directement lié à un tremblement de terre le rend particulièrement intéressant. Il s'agit de l'événement le plus important recensé dû à un séisme (en excluant Fukushima).

Le 16 juillet 2007, un séisme de magnitude 6,8 survient à 16 km de la centrale générant selon la localisation des réacteurs, un *PGA* allant de 1,5 à 2,5 fois leur valeur de conception entraînant ainsi l'arrêt de six réacteurs. De plus, des fuites mineures de matières radioactives ont eu lieu sans conséquences sur l'environnement d'après TEPCO [93] l'exploitant. La principale source de coût résulte de l'arrêt prolongé de deux à trois ans des réacteurs. D'ailleurs, deux d'entre eux sont encore à l'arrêt aujourd'hui. Le coût de l'incident selon TEPCO [94] est estimé à 5,62 milliards de dollars à fin 2007, soit 6,15 milliards d'euros à fin 2016.

L'incident de Three Mile Island (USA 1979) [95] de niveau 5 sur l'échelle INES a pour origine d'une défaillance dans le système d'information de sécurité de la centrale. Une fausse indication a entraîné une succession de mauvaises décisions de la part des opérateurs conduisant à une fusion partielle du cœur du réacteur. Néanmoins, l'enceinte de confinement du réacteur n'ayant pas cédée, les rejets radioactifs dans l'environnement furent minimes et le pire a été évité. Cet incident est estimé à 2,8 milliards d'euros.

Pour rappel, la classe (4) telle que définie par l'IAEA prévoit

93. TEPCO est également l'exploitant du site de Fukushima.
94. Source : Accident de Kashiwazaki Kariwa.
95. Voir le site de l'IRSN pour plus de détails sur l'accident de Three Miles Island : Three Mile Island (USA 1979) IRSN.

- Une défaillance sévère des composants et des systèmes non prévus pour résister à un séisme ;
- Une défaillance générale des composants et des systèmes prévus pour résister à un séisme (défaillance du système de refroidissement des réacteurs).

Pour la classe (4), nous faisons donc l'hypothèse d'un scénario où les conséquences des défaillances se limitent principalement au site de la centrale nucléaire, avec toutefois quelques rejets limités à proximité du site. Dans ce scénario, le coût économique résulte donc principalement de l'interruption de la production d'électricité et des réparations de la centrale. Contrairement aux scénarios extrêmes des classes (5) et (6) où des frais importants de décontaminations sont à prévoir, les coûts radiologiques sont moindres. De plus, les bornes de *PGA* de cette classe (1,2 à 2 fois la valeur de conception du site de Fessenheim) sont du même ordre que celle de l'accident Kashiwazaki Kariwa (1,5 à 2,5 fois la valeur de conception). Assigner ce type d'événement à la classe (4) paraît donc crédible. Pour tenir compte de l'incertitude liée aux coûts de ces incidents, nous retenons un coût compris entre 1 Milliard d'euros et 10 milliards d'euros.

Classe	PGA [g]	Période de retour modélisée (*en année*)	Coût (*en Mrd€*)	Conséquences potentielles
(4)	0,408 à 0,68	19005 à 155320	[1 ; 10]	Arrêt prolongé des réacteurs Quelques rejets hors site Coût de réparation important

Tab. 17 - Classes (4) : Scénarios et intervalle de coût.

7.1.3 Scénarios des classes (2) et (3)

Tout d'abord, dans la mesure où il est difficile au vu des informations disponibles de séparer les classes (2) et (3), nous les réunissons pour former une seule et unique classe avec des valeurs possibles de *PGA* allant de 0,204 à 0,408 g.

Jusqu'à ce jour, à part l'exemple de Fukushima et celui de Kashiwazaki Kariwa, les conséquences d'un séisme se limitent souvent à un arrêt des réacteurs plus ou moins prolongé et à un endommagement partiel de quelques éléments de la centrale. Parfois un séisme peut également déclencher un incendie ou entraîner une légère contamination d'une partie du site. Par exemple le renversement d'un baril contenant des déchets radioactifs sous l'effet de la secousse. Concernant les réacteurs, ceux-ci doivent à partir d'un certain niveau de *PGA* s'arrêter automatiquement par mesure de sécurité. Avant d'être redémarrés, les réacteurs subissent un examen approfondi afin de s'assurer de leur bon fonctionnement. Pendant ce laps de temps, d'une semaine à quelques années, la production d'électricité du site diminue fortement entraînant un coût dû à l'interruption de l'activité. De plus, selon les pièces à changer, le coût peut fortement varier.

Étant donné la difficulté d'obtenir des coûts pour ce type de scénario, nous considérons tous les cas listés (13 au total) dans SOVACOOL [2008] ayant entraînés l'arrêt d'un ou plusieurs réacteurs, avec ou sans remplacements d'éléments de la centrale. Les bornes inférieure et supérieure de cette classe sont délimitées par les événements suivants :

- San Onofre (USA 1982) : Un réacteur s'arrête suite à un tremblement de terre. Le coût est estimé à 1,2 millions d'euros ;

- Crystal River (USA 1996) : Un dysfonctionnement d'un composant entraîne l'exploitant à arrêter un réacteur et à réparer la pièce défectueuse. le coût est estimé à 447 millions d'euros.

De même que précédemment, nous élargissons légèrement l'intervalle de coût pour construire une classe de 1 à 500 millions d'euros.

Classe	PGA [g]	Période de retour modélisée (*en année*)	Coût (*en M€*)	Conséquences potentielles
(2) (3)	0,204 à 0,408	1711 à 19005	[1 ; 500]	Arrêt des réacteurs Légère contamination éventuelle sur le site Remplacements de pièces endommagées

Tab. 18 - Classes (2) (3) unifiées : Scénarios et intervalle de coût.

7.1.4 Segmentation des coûts intra-classe par garantie

Les coûts définis lors de la section précédente englobent la totalité des pertes économiques enregistrées. A priori, nous ne savons pas exactement dans quelle proportion ces pertes peuvent être imputées à différentes catégories de sinistre. En effet, qu'il s'agisse d'une perte suite à une contamination hors du site, ou suite à un dommage à la structure de la centrale, ces dernières n'affectent pas les mêmes garanties. Par conséquent, pour mieux approcher le risque du point de vue de l'assureur, il convient donc de segmenter ces montants globaux en catégories de sinistre. Le but étant de définir quelle garantie peut être touchée. En se basant, sur les garanties couvertes par Assuratome [96] nous avons retenu la segmentation suivante :

- Garantie Dommage : tout dommage survenant sur le site de l'exploitant résultant par exemple, d'un incendie, d'une explosion, d'une catastrophe naturelle ou encore d'un dégât des eaux. Cette garantie inclut également le bris de machines, la perte d'exploitation ou encore la réhabilitation de la centrale ;
- Garantie RC nucléaire : concerne les dommages nucléaires survenant hors de l'installation de l'exploitant, par exemple :
  - Prise en charge des coûts liés à la décontamination de l'environnement ;
  - Indemnisation des victimes de la radioactivité ;
  - Indemnisation des personnes devant être évacuées des zones contaminées.

Pour créer cette segmentation, nous nous sommes principalement appuyé sur les travaux de l'IRSN présentés à la figure 32. À partir de cette étude, nous pouvons calculer le rapport des coûts pouvant impacter la garantie RC Nucléaire et la garantie Dommage pour un accident grave (INES 6) et un accident majeur (INES 7). Cependant, dans les travaux de l'IRSN ne figurent pas explicitement les coût liés à la perte d'exploitation. Ils sont éventuellement compris dans la section « effets sur le parc de production d'électricité ». Cependant, d'après EDF le chiffre d'affaire de la centrale de Fessenheim serait de 500 millions d'euros annuels. Dans le cas d'un accident grave ou majeur, nous faisons l'hypothèse vraisemblable que la perte d'exploitation est totale.

Ainsi, à partir des données de l'IRSN et du chiffre d'affaire de 500 millions d'euros, nous calculons la part du coût total pouvant impacter chaque garantie pour chaque type d'accident (grave et majeur) :

96. Source : http://www.assuratome.fr/fr/24-les-assurances-de-dommages.

Pour la garantie Dommage :

$$\text{Part Dommage} = \frac{\text{Coûts sur site} + \text{Perte d'exploitation}}{\text{Coût total}}$$

Pour la garantie RC nucléaire :

$$\text{Part RC Nucléaire} = \frac{\text{Coûts des territoires contaminés} + \text{Coûts radiologiques hors site}}{\text{Coût total}}$$

Par conséquent, nous obtenons les parts suivantes pour les classes (5) et (6) :

Classe de dommages	RC nucléaire	Dommage
(5)	16,7%	8,8%
(6)	36,4%	3,4%

Tab. 19 - Segmentation du coût total pour la classe (5) et (6).

Pour la classe (4), les conséquences envisagées sont principalement dues à un arrêt prolongé des réacteurs et des coûts de réparation importants. Nous faisons donc l'hypothèse que 95% des coûts peuvent impacter la garantie Dommage contre 5% pour la garantie RC nucléaire. Pour la classe (3), les dommages se limitant uniquement au site nucléaire, nous concluons que seule la garantie Dommage peut être touchée. Le récapitulatif des caractéristiques est donné dans la section suivante à la table 20.

7.1.5 Récapitulatif de la construction des classes

À travers la construction des classes, nous avons pu voir à quel point il s'avère délicat d'estimer le coût d'un accident nucléaire, et encore plus en ne considérant que le cas particulier des tremblements de terre. Pour y parvenir, nous avons été conduit à poser des hypothèses plus ou moins fortes. Cependant, nous avons essayé d'être le plus réaliste possible. L'historique est pauvre et les informations précises manquent à ce sujet, une toute autre personne aurait pu raisonner autrement et construire les classes de façon différente.

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques de chacune des classes créées précédemment :

Classe	PGA [g]	Période de retour modélisée (*en année*)	Coût *(en Mrd€)*	Part RC Nucléaire	Part garantie Dommage	Conséquences potentielles
(2) (3)	0,204 à 0,408	1 711 à 19 005	[0,001 ; 0,5]	0%	100%	Arrêt des réacteurs Légère contamination éventuelle sur le site Remplacements de pièces endommagées
(4)	0,408 à 0,68	19 005 à 155 320	[1 ; 10]	5%	95%	Arrêt prolongé des réacteurs Quelques rejets hors site Coût de réparation important
(5)	0,68 à 1,02	155 320 à 955 390	[51 ; 253]	16,7%	2,3%	Accident grave (INES 6)
(6)	>1,02	>955 390	[202 ; 1012]	36,4%	3,4%	Accident majeur (INES 7)

Tab. 20 - Table récapitulative des classes de coût en fonction du *PGA*.

7.2 Création d'un générateur de pertes extrêmes

À ce stade de l'étude, nous disposons d'une loi permettant de resimuler des valeurs extrêmes de *PGA* via une *GPD* (équation (27)) et des classes de coût économique par tranche de *PGA* (table 20). Il reste donc à trouver une méthode de simulation de montant pour chacune des classes afin d'obtenir un générateur complet de perte.

7.2.1 Mécanisme du générateur de perte

Afin de créer un générateur de perte sur le site de Fessenheim nous avons pensé au mécanisme suivant :

1. Simulation d'une loi de Bernoulli de paramètre $p = 0,0016$. p représentant la probabilité d'observer un dépassement du seuil de *PGA* de 0,142 (Paramètre défini à la section 6.2.1) ;
2. Si un dépassement de seuil se produit alors une valeur de *PGA* conditionnelle au dépassement de seuil est simulée par la *GPD* ;
3. Simulation par inversion d'une loi de coût tronquée en fonction des bornes de coût de la classe d'appartenance du *PGA* simulée en 2. Par exemple, si le *PGA* simulé appartient à la classe (4) nous simulons un montant dans une loi de coût tronquée entre 1 et 10 milliard d'euros.

Ainsi, le mécanisme précédent nécessite une loi avec laquelle simuler des coûts à l'intérieur d'une classe donnée.

7.2.2 Calibration d'une loi de coût

De façon à calibrer cette loi, nous avons extrait les informations concernant les montants d'accidents nucléaires entre 1952 et 2006 présentés dans SOVACOOL [2008]. Puis, nous avons corrigé ces montants de l'inflation avant de les convertir en euro au taux Dollar-Euro du 1er janvier 2017. Enfin, comme les accidents survenus après 2006 ne sont pas recensés, nous avons ajouté à cette liste les événements de Fukushima (170 Mrd€) et de Kashiwazaki Kariwa (6,15 Mrd€) pour obtenir une base de données de 64 entrées.

Dans un premier temps, analysons brièvement les statistiques descriptives de la base.

Moyenne	Médiane	Minimum	Maximum	1er quartile	3ème quartile
10390	51,8	1,2	475000	19,8	146,5

Tab. 21 - Statistiques descriptives de la base de données (*en M€*).

Au vu des statistiques descriptives de la table, nous pouvons constater que la médiane (51,8 M€) est largement en dessous de la moyenne (10390 M€). De plus, le 3ème quartile est nettement inférieur à la moyenne, ce qui signifie qu'au moins 75% des données sont en-dessous de celle-ci. Ceci sous-entend que la base contient des événements extrêmes très éloignés du coeur de la distribution. Ce constat est tout à fait logique car tout les montants de la base sont inférieurs à 6,5 milliards d'euros, sauf ceux de Fukushima et de Tchernobyl. Par conséquent, nous orientons notre choix de modélisation vers des distributions à queue lourde. Nous avons principalement retenu deux lois de la même famille à tester, la loi de

Burr et un cas particulier de cette dernière, la loi de Pareto Type II. Nous avons également essayé de calibrer une loi plus standard, la loi Log-normal.

Comme lors de la modélisation de la magnitude et de la *GPD*, nous estimons les paramètres des lois par maximum de vraisemblance[97] à l'aide du package *fitdistrplus* de R (voir 4.3.3). Puis, nous analysons le graphique de la fonction de répartition empirique contre celles des trois lois ajustées, ainsi que le *QQ-Plot* et le *PP-Plot*. Pour rappel, le *QQ-Plot* permet principalement d'analyser les écarts au niveaux des queues de distribution, alors que le *PP-Plot* aide à juger de l'adéquation au niveau du cœur de la distribution (voir DELIGNETTE-MULLER *et al.* [2015]).

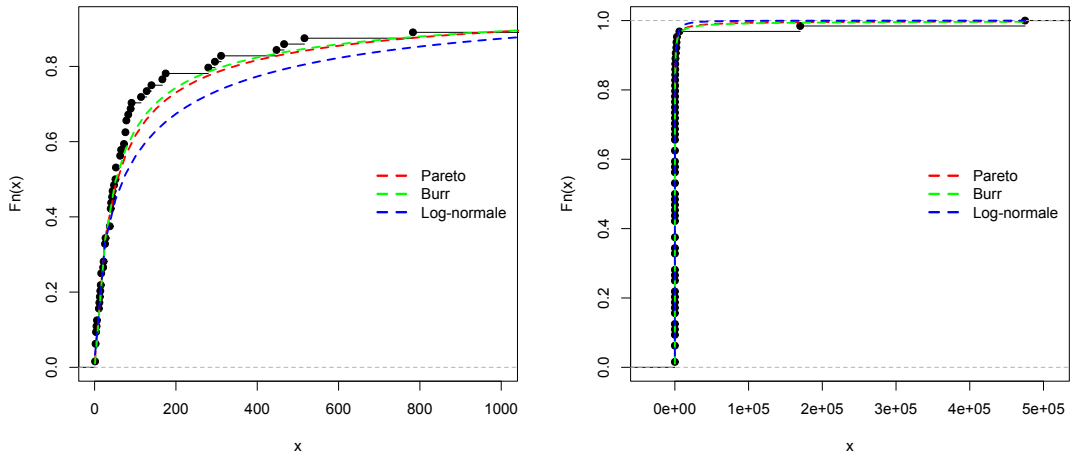


Fig. 33 - Ajustements des lois Log-normale, de Burr et de Pareto à la fonction de répartition empirique. À gauche : représentation jusqu'à 1 Mrd€ ; À droite : distribution complète.

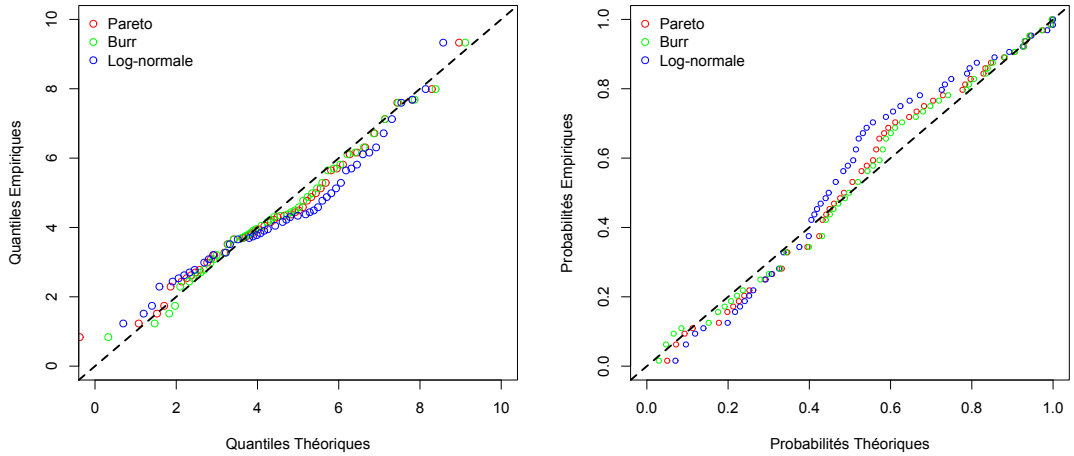


Fig. 34 - À gauche : Diagramme quantile-quantile (*QQ-plot*) ; À droite : Diagramme probabilité-probabilité (*PP-plot*).

Dans un premier temps, l'analyse des fonctions empiriques modélisées contre la fonction de répartition empirique (figure 33 à gauche) montre que la loi de Burr semble bien s'ajuster à la distribution empirique dans son ensemble. Avec cependant, un léger décalage au niveau des quantiles situés entre 100 et 200. La loi de Pareto est proche des performances de la loi Burr mais légèrement en retrait. La loi Log-normale en revanche s'ajuste

97. Le résultat de la procédure d'estimation des paramètres ainsi que le rappel des densités sont donnés à l'annexe G.

mal aux données. Ceci est dû au fait que la distribution empirique contient des valeurs extrêmes trop éloignées du reste de la distribution. L'étude complémentaire du *QQ-plot* et du *PP-plot* mène aux mêmes conclusions. En effet, nous constatons que tant sur les queues de distribution à gauche et à droite (*QQ-plot*), que sur le coeur de la distribution (*PP-plot*), la loi de Burr s'ajuste mieux aux données. Pour confirmer cet examen visuel, nous effectuons le test de Cramér-Vons Mises pour les trois lois (voir 4.3.4). les résultats sont les suivants :

Loi	Statistique	*p-value*
Pareto	0,10	0,59
Burr	0,07	0,77
log-normale	0,29	0,15

Tab. 22 - Modélisation d'une loi de coût : Test de Cramér-Von Mises.

Le test vient confirmer l'analyse graphique. Tout d'abord, remarquons qu'aucune des trois lois n'est rejetée pour un seuil critique de niveau 0,05. Ensuite, la statistique du test est minimale pour la loi de Burr et celle de la Pareto est relativement proche de la première. De plus, la statistique du test de la loi Log-normale illustre la sous-performance de l'ajustement comparée aux lois de Burr et de Pareto. Finalement, l'analyse graphique et le test de Cramér-Von Mises nous conduisent à retenir la loi de Burr pour modéliser la distribution de coût. Le fait que la loi de Burr s'ajuste mieux à la distribution empirique que la loi de Pareto n'est pas surprenant. En effet, celle-ci dispose d'un paramètre de forme supplémentaire (voir 7.2.1), ce qui lui confère plus de souplesse pour s'ajuster à une distribution à queue épaisse.

La distribution de Burr retenue pour modéliser la distribution de coût a pour fonction de répartition (voir l'annexe G pour l'estimation des paramètres et le rappel des densités)

$$F(x) = 1 - \left[1 + \left(\frac{x}{\theta}\right)^{\gamma}\right]^{-\alpha} \tag{28}$$

avec $\alpha = 0,43$, $\gamma = 1,29$ et $\theta = 17,89$.

Dans le but d'implémenter le point 3 du générateur de pertes extrêmes, nous utilisons le principe de la troncature énoncé à la section 4.6 et le théorème 1 sur l'inverse généralisé d'une fonction de répartition continue.

Dans le cas de la loi de Burr, l'inverse de la fonction de répartition s'exprime de façon analytique. En effet,

$$\begin{aligned} F(x) &= 1 - \left[1 + \left(\frac{x}{\theta}\right)^{\gamma}\right]^{-\alpha} \\ \iff F^{-1}(u) &= \theta[(1-u)^{-\frac{1}{\alpha}} - 1]^{\frac{1}{\gamma}} \end{aligned}$$

Alors, si la variable aléatoire X suit une loi de Burr,

$$X \sim F^{-1}(U) = \theta[(1-U)^{-\frac{1}{\alpha}} - 1]^{\frac{1}{\gamma}} \tag{29}$$

Notons respectivement x^C_{inf} et x^C_{sup} les bornes de coût pour une classe c dans laquelle nous souhaitons simuler un montant selon la loi de Burr tronquée. Alors, pour appliquer la troncature directement dans la simulation de la loi uniforme, nous recherchons la valeur

minimale et maximale que peut prendre U afin que le coût simulé soit dans l'intervalle $[x^C_{inf}\,;x^C_{sup}]$. Cela revient à rechercher u tel que

$$x^C_{inf} \leq \theta[(1-u)^{-\frac{1}{\alpha}} - 1]^{\frac{1}{\gamma}} \leq x^C_{sup}$$

Nous avons

$$\begin{aligned} & x^C_{inf} \leq \theta[(1-u)^{-\frac{1}{\alpha}} - 1]^{\frac{1}{\gamma}} \leq x^C_{sup} \\ \Longleftrightarrow\ & [1 + (x^C_{inf}/\theta)^{\gamma}]^{-\alpha} \leq 1 - u \leq [1 + (x^C_{sup}/\theta)^{\gamma}]^{-\alpha} \\ \Longleftrightarrow\ & \bar{F}(x^C_{sup}) \leq u \leq \bar{F}(x^C_{inf}) \end{aligned}$$

En notant $\widetilde{U}$ la loi uniforme sur $[\bar{F}(x^C_{sup})\,;\ \bar{F}(x^C_{inf})]$, nous obtenons une loi de Burr tronquée pour chaque classe telle que

$$F^{(C)-1}(\widetilde{U}) = \theta[(1-\widetilde{U})^{-\frac{1}{\alpha}} - 1]^{\frac{1}{\gamma}} \overset{\text{loi}}{=} \theta[\widetilde{U}^{-\frac{1}{\alpha}} - 1]^{\frac{1}{\gamma}} \tag{30}$$

7.3 Résumé du mécanisme du générateur de pertes

Dorénavant, nous disposons de tous les éléments du générateur. À partir de la distribution simulée du *PGA* (voir 4.9), nous avons été en mesure de construire une loi de dépassement de seuil répliquant le comportement de la queue de distribution du *PGA*. Cette dernière nous permet ainsi de resimuler l'impact d'un séisme sur le site de Fessenheim en se concentrant uniquement sur les événements extrêmes. Puis, en posant des hypothèses les plus réalistes possibles au vu de l'information disponible, nous avons construit des classes de coûts potentiels associées à des intervalles de *PGA*. Ensuite, nous avons calibré une loi de Burr sur les pertes de l'industrie nucléaire présentées dans SOVACOOL [2008] pour obtenir une loi de coût. En procédant à une troncature à gauche et à droite de la loi de Burr en fonction des bornes de coût de chaque classe, il est désormais possible de tirer un montant de perte (équation 30) conditionnel à la classe du *PGA* resimulée via la *GPD* (équation 27). Enfin, nous avons réalisé une segmentation du coût total en fonction des garanties que les pertes sont susceptibles de toucher.

En somme, nous pouvons ainsi simuler des scénarios de pertes extrêmes consécutifs à un séisme sur la centrale de Fessenheim tout en fournissant une estimation du montant pouvant être réclamé au titre de la garantie RC nucléaire et Dommage.

7.4 Exemple de résultat du générateur

Afin d'illustrer les pertes brutes produites par le générateur pour la centrale nucléaire de Fessenheim, nous résumons dans la table ci-dessous, les résultats obtenus pour 12,5 millions d'années simulées. Précisons que les années où un séisme entraîne un *PGA* supérieur au seuil de 0,142 g, mais en deçà de la borne inférieure de la classe (2) et (3) (0,204 g) ne figurent pas dans la table. Ces événements sont au nombre de 5702 et ne sont pas pris en compte dans les coûts globaux. De plus, les montants présentés ci-dessous sont conditionnels au fait qu'un dommage est lieu. De fait, les coûts moyens et médians déconditionnés sont beaucoup plus faibles.

		Coût Total (*en M€*)		Coût RCN (*en M€*)				Coût Dommage (*en M€*)			
Classe	Nombre d'événements	Moyen	Médian	Moyen	Médian	Min	Max	Moyen	Médian	Min	Max
(2) (3)	17 420	19	3	0	0	0	0	19	3	1	499
(4)	933	3 029	2 251	151	113	50	498	2 877	2 138	951	9 459
(5)	77	121 667	107 599	20 683	18 292	8 719	41 777	10 646	9 415	4 488	21 503
(6)	12	472 407	416 212	170 066	149 836	81 112	353 656	14 172	12 486	6 759	29 471
Global	18 442	987	4	205	0	-	-	217	4	-	-

Tab. 23 - Résultat du générateur de pertes pour 12,5 millions d'années simulées.

Pour la classe (5) et (6), les coûts totaux médians simulés sont proches[98] de ceux préconisés par l'IRSN (table 32) ce qui nous rassure sur la cohérence générale du générateur pour les pertes extrêmes. Les coûts moyens sont largement tirés à la hausse par les accidents graves et majeurs, contrairement aux coûts médians qui sont bas de par une grande fréquence d'événements dans la classe (2) et (3).

La table ci-dessous représente les coûts moyens annualisés incluant les années sans événements.

Classe	Coût total moyen (*en €*)	Coût RCN moyen (*en €*)	Coût Dommage moyen (*en €*)
(2) (3)	26 897	0	26 897
(4)	226 050	11 303	214 748
(5)	749 469	127 410	65 579
(6)	453 510	163 264	13 605
Global	1 455 927	301 976	320 829

Tab. 24 - Coût moyen annuel obtenu via le générateur.

Encore une fois, les résultats illustrent bien le fait que nous considérons ici des événements extrêmes. En effet, ramenés à l'année les montants semblent "dérisoires". Cependant, dans notre cas le fait de représenter une perte annualisée a peu de sens. Le centre d'attention étant la réalisation d'un séisme pouvant engendrer un accident grave ou majeur ainsi que la perte associée.

7.5 Limites et axes d'amélioration du modèle

La première limite se situe dans le fait que l'information et les données auxquelles nous avons pu avoir accès étaient très restreintes. Ainsi, le fait de créer un générateur de pertes fut un véritable challenge. Pour y parvenir nous avons du faire plusieurs hypothèses et simplifications.

Dans la modélisation statistique de l'aléa sismique, nous n'avons pas tenu compte du phénomène de réplique. En effet, souvent à la suite d'un tremblement de terre puissant, d'autres séismes souvent moins importants peuvent survenir. Ce fut notamment le cas pour le séisme d'Amatrice que nous avons évoqué. Après un tremblement de terre de magnitude 6,2, plusieurs répliques ont eu lieu dont une de magnitude 5,4. Même si ces répliques sont

98. Classe (5) : 108 Mrd€ contre 120 Mrd€ pour l'IRSN ; Classe (6) :416 Mrd€ contre 450 Mrd€ pour l'IRSN.

généralement moins puissantes, nous pourrions imaginer qu'elles puissent effectivement engendrer un accident nucléaire sur une centrale fragilisée par la secousse principale. De plus, nous n'avons pas pris en compte le phénomène de dépendance temporelle pouvant exister entre la survenance de deux événements sismiques majeurs. Les séismes ont été générés de manière indépendante d'une année à l'autre.

L'équation de *PGA* utilisée est aussi une limite du modèle. En effet, celle-ci n'a pas été calibrée dans la région autour du site de Fessenheim. il aurait été plus précis de disposer de l'information nécessaire pour élaborer un modèle à l'échelle locale de la centrale nucléaire. En outre, nous n'avons pas tenu compte des effets dits "de site". Ces effets correspondent à l'atténuation ou à l'accentuation de la vitesse des ondes en fonction des propriétés géologiques du sol. Ce dernier point est une des pistes d'amélioration que nous envisageons actuellement.

8 Conséquences pour le secteur de l'assurance

L'information autour du risque nucléaire, souvent sensible et confidentielle, est compliquée à recueillir. C'est pourquoi, à l'heure actuelle, il nous est difficile de quantifier précisément la part du risque qu'aurait à supporter l'assureur si des pertes telles que celles de la table 23 venaient à se présenter suite à un séisme. Les mécanismes des pools et les interactions entre ces derniers restent à ce jour mal connus. Par exemple, nous ne connaissons pas dans quelle mesure Assuratome rétrocède le risque aux autres pools, ni d'ailleurs les clauses précises de chaque garantie (RC Nucléaire et Dommage).

Avec l'entrée en vigueur prochaine du protocole d'amendement de 2004 de la convention de Paris, le groupe AXA a dorénavant la volonté de centraliser les informations de ces différentes entités pour mieux identifier le risque dans son ensemble. C'est dans ce cadre, que s'inscrira le générateur de perte construit dans ce mémoire. En effet, une fois que nous aurons pu regrouper les différents engagements pris par les entités aussi bien à travers les Pools qu'en affaire directe, le générateur nous permettra de réaliser des scénarios extrêmes de pertes nettes pour l'ensemble du groupe. Bien que nous nous sommes focalisé sur le site de Fessenheim dans nos travaux, la méthodologie appliquée est facilement transposable à d'autres sites nucléaires établis dans d'autres zones sismiques françaises. Le fait d'avoir rendu la carte des régions sismotectoniques exploitable (voir 3.5) nous procure un outil précieux permettant d'étendre la méthodologie à tout site nucléaire français.

Quoi qu'il en soit, le Protocole de 2004 amendant la convention de Paris n'est aujourd'hui toujours pas entré en vigueur. Dans sa version actuelle, les accidents nucléaires consécutifs à des cataclysmes naturelles sont exclus du champ de la convention. Par conséquent, en cas d'accident nucléaire consécutif à séisme, l'assureur ne pourrait être touché qu'au titre de la garantie Dommage. Néanmoins, il existerait un risque de cumul non négligeable entre la garantie Dommage de la centrale et les victimes directes du tremblement de terre. Lorsque le Protocole entrera en vigueur, en plus de porter la responsabilité de l'exploitant de 91,5 à 700 millions d'euros minimum et la durée de prescription de 10 à 30 ans, le risque sera d'autant plus grand que les catastrophes naturelles entreront dans le champ de la convention de Paris.

Les conséquences d'une catastrophe nucléaire pour l'assureur pourraient aller bien au-delà de l'indemnisation, aussi haute soit-elle à laquelle il devrait avoir à faire face. Un accident majeur en France entraînerait vraisemblablement une crise plus globale à caractère systémique et éventuellement plus onéreuse que les pertes assurées. En effet,

l'impact sur l'économie serait inévitable, des secteurs comme l'agriculture et le tourisme serait fortement touchés. De plus, les marchés financiers pourraient réagir de manière négative à la catastrophe et le CAC40 fortement chuter. Une grande partie des coûts de la catastrophe serait financée par de la dette d'État creusant ainsi le déficit de la France. Ceci pourrait engendrer une dégradation de la note du pays et donc une baisse de la qualité de ses obligations. Ainsi, l'assureur en tant qu'investisseur pourrait subir de lourdes pertes sur une partie de son portefeuille d'actifs financiers.

Conclusion

les travaux entrepris dans ce mémoire, nous ont permis d'appréhender le risque nucléaire d'un point de vue assurantiel. L'analyse du cadre juridique en matière de responsabilité civile nucléaire fut l'occasion d'établir les nouveaux enjeux qui se présenteront au secteur de l'assurance. Dans un avenir proche, les importantes modifications de la Convention de Paris induites par le Protocole d'amendement de 2004 impacteront directement l'assureur. En augmentant le montant de la responsabilité de l'exploitant de 91,5 millions à 700 millions d'euros minimum, ces derniers devront réagir en adaptant leurs capacités en conséquence. D'autant plus que l'allongement de la durée de prescription de 10 à 30 ans accentuera mécaniquement les demandes en réparation auprès de l'exploitant, et donc les chances pour que la garantie financière de ce dernier soit totalement engagée. Le retrait de la clause d'exonération de la responsabilité de l'exploitant suite à une catastrophe naturelle, élargira la portée de la convention en créant ainsi de nouveaux risques, certes très rares, mais potentiellement dangereux pour l'assureur s'ils venaient à se produire. Notamment, un risque de cumul qu'il conviendra d'identifier dans de futurs projets. Dans le cadre de la France, nous avons vu que celle-ci a d'ores et déjà transposé les nouvelles dispositions prévues par la convention de Paris dans sa législation. Ainsi, la France se tient prête à mettre en application le protocole dès qu'il entrera en vigueur.

L'étude menée sur le site de Fessenheim nous a permis, en partant de la simulation de l'aléa sismique, d'élaborer un générateur de pertes brutes pour chacune des garanties couvrant l'exploitant, dommage sur site et responsabilité civile nucléaire. Il reste donc à ce jour à regrouper les données de souscription du risque nucléaire des différentes entités d'AXA. Une fois ces informations connues, nous serons à même d'appliquer l'ensemble des conditions assurantielles, et ainsi de générer des pertes nettes pour l'ensemble du groupe. Par la suite, ce générateur sera utilisé dans la quantification du risque de cumul entre, d'une part les polices de l'exploitant couvrant uniquement l'accident nucléaire, et d'autre part les polices standards directement touchées par le séisme. S'agissant ici de travaux préparatoires, nous voulions tester la faisabilité de la méthode sur un site nucléaire donné, avant de l'étendre sur l'ensemble des centrales françaises. C'est pourquoi, nous avons choisi la très emblématique et controversée centrale nucléaire de Fessenheim qui de plus, semble être l'installation nucléaire la plus exposée au risque sismique en France.

Nous avons également pu voir que les assureurs s'organisent autour de Pools de co(ré)assurance comme Assuratome afin de mutualiser leurs capacités de couverture. En revanche, ils ne sont pas les seuls acteurs de ce marché très spécifique. Les mutuelles EMANI et ELINI spécialisées dans le risque nucléaire viennent directement concurrencer ces Pools. De plus, celles-ci travaillent en étroite collaboration avec les exploitants en rétrocédant à leurs captives du risque par un mécanisme de *fronting*. Ainsi, en cas d'événement majeur, même s'il est difficile de connaître précisément la répartition des coûts entre les différents acteurs, une part de la garantie financière sera conservée par l'exploitant lui-même via sa propre captive de réassurance.

Après l'entrée en vigueur du Protocole de 2004, la combinaison de la Convention de Paris et de la Convention complémentaire de Bruxelles portera à 1,5 milliard d'euros les montants à allouer à l'indemnisation des victimes. Or, il est vraisemblable que les coûts radiologiques d'un accident majeur, en France ou en Europe, seraient largement supérieurs à ce qui peut être alloué au titre de ces conventions. Cela conduit naturellement à réfléchir à de nouvelles sources de financement du risque nucléaire. À l'instar du Price-Anderson Act, nous pourrions imaginer un système européen où, dès lors qu'un accident majeur survient, les exploitants auraient à payer une prime en fonction du nombre de réacteurs

installés (129 au total[99] en 2016). Par un calcul rapide, en reprenant le montant de prime prévu par loi américaine de 115 millions d'euros par réacteur en 2014, cela donnerait une capacité globale 14,8 milliards d'euros à l'échelle de l'Europe. Bien sûr nous ne jugeons pas de la faisabilité de ce projet, certains exploitants pourraient être réticents au fait de participer à un sinistre dont ils ne sont pas responsables. Une autre solution envisageable pourrait être la mise en place d'un mécanisme de transfert de risque, de l'exploitant vers les marchés financiers. Cette pratique de titrisation est dorénavant largement utilisée pour la couverture des catastrophes naturelles à travers les *cat bonds*. Elle offre à l'assureur une alternative à la réassurance classique et permet à l'investisseur de diversifier son portefeuille d'actifs. Ainsi, nous pourrions imaginer la mise en place d'un nouveau produit : le *nuclear bond*.

Rappelons nous que la probabilité d'un accident nucléaire reste très faible, encore plus consécutivement à un séisme. Parmi les trois catastrophes majeures[100], seule celle de Fukushima est liée à un tremblement de terre (les deux autres étant la conséquence d'erreurs humaines). Depuis ce drame les niveaux de sûreté des installations nucléaires ont largement été revus à la hausse par les autorités compétentes. Néanmoins, comme l'a dit Emil Julius Gumbel, « *It's impossible that the improbable will never happen*».

99. Source : http://www.connaissancedesenergies.org
100. Kyshtym (Russie 1957), Tchernobyl (Ukraine 1986 et Fukushima (Japon 2011).

Annexes

A Reproduction de l'article 1 (a) et (b) de la Convention de Paris de 1960, amendée en 1964 et 1982

Article 1

a) Au sens de la présente convention :

i) "Un accident nucléaire" signifie tout fait ou succession de faits de même origine ayant causé des dommages, dès lors que ce fait ou ces faits ou certains des dommages causés proviennent ou résultent soit des propriétés radioactives, ou à la fois des propriétés radioactives et des propriétés toxiques, explosives ou autres propriétés dangereuses des combustibles nucléaires ou produits ou déchets radioactifs, soit de rayonnements ionisants émis par une autre source quelconque de rayonnements se trouvant dans une installation nucléaire.

ii) "Installation nucléaire" signifie les réacteurs à l'exception de ceux qui font partie d'un moyen de transport ; les usines de préparation ou de fabrication de substances nucléaires ; les usines de séparation des isotopes de combustibles nucléaires ; les usines de traitement de combustibles nucléaires irradiés ; les installations de stockage de substances nucléaires à l'exclusion du stockage de ces substances en cours de transport, ainsi que toute autre installation dans laquelle des combustibles nucléaires ou des produits ou des déchets radioactifs sont détenus et qui serait désignée par le Comité de Direction de l'Energie Nucléaire de l'Organisation (appelé ci-après le "Comité de Direction") ; toute Partie Contractante peut décider que seront considérées comme une installation nucléaire unique, plusieurs installations nucléaires ayant le même exploitant et se trouvant sur le même site, ainsi que toute autre installation sur ce site où sont détenues des matières radioactives.

iii) "Combustibles nucléaires" signifie les matières fissiles comprenant l'uranium sous forme de métal, d'alliage ou de composé chimique (y compris l'uranium naturel), le plutonium sous forme de métal, d'alliage ou de composé chimique et toute autre matière fissile qui serait désignée par le Comité de Direction.

iv) "Produits ou déchets radioactifs" signifie les matières radioactives produites ou rendues radioactives par exposition aux radiations résultant des opérations de production ou d'utilisation de combustibles nucléaires, à l'exclusion, d'une part, des combustibles nucléaires et d'autre part, lorsqu'ils se trouvent en dehors d'une installation nucléaire, des radioisotopes parvenus au dernier stade de fabrication qui sont susceptibles d'être utilisés à des fins industrielles, commerciales, agricoles, médicales, scientifiques ou d'enseignement.

v) "Substances nucléaires" signifie les combustibles nucléaires (à l'exclusion de l'uranium naturel et de l'uranium appauvri) et les produits ou déchets radioactifs.

vi) "Exploitant" d'une installation nucléaire signifie la personne désignée ou reconnue par l'autorité publique compétente comme l'exploitant de cette installation nucléaire.

b) Le Comité de Direction pourra décider qu'une catégorie d'installations nucléaires, de combustibles nucléaires ou de substances nucléaires sera, en raison des risques réduits qu'elle comporte, exclue du champ d'application de la présente Convention.

B Reproduction de l'article 12 de la Convention de Bruxelles de 1963, amendée en 1964 et 1982

Article 12

a) La clé de répartition selon laquelle les Parties Contractantes allouent les fonds publics visés à l'article 3 b) iii) est calculée :

i) à concurrence de 50 pour cent, sur la base du rapport existant entre, d'une part, le produit national brut aux prix courants de chaque Partie Contractante et, d'autre part, le total des produits nationaux bruts aux prix courants de toutes les Parties Contractantes, tels qu'ils résultent de la statistique officielle publiée par l'Organisation de Coopération et de Développement Economiques pour l'année précédant celle au cours de laquelle l'accident nucléaire sera survenu ;

ii) à concurrence de 50 pour cent, sur la base du rapport existant entre, d'une part, la puissance thermique des réacteurs situés sur le territoire de chaque Partie Contractante et, d'autre part, la puissance thermique totale des réacteurs situés sur l'ensemble des territoires des Parties Contractantes. Ce calcul sera effectué sur la base de la puissance thermique des réacteurs figurant, à la date de l'accident, sur la liste prévue à l'article 2 a) i). Cependant, un réacteur n'est pris en considération pour ce calcul qu'à partir de la date à laquelle il a atteint, pour la première fois, la criticalité.

b) Au sens de la présente Convention, "puissance thermique" signifie :

i) avant la délivrance de l'autorisation d'exploitation définitive, la puissance thermique prévue ;

ii) après cette délivrance, la puissance thermique autorisée par les autorités nationales compétentes.

C Description de l'échelle INES

DESCRIPTION ET NIVEAU INES	POPULATION ET ENVIRONNEMENT	BARRIÈRES ET CONTRÔLES RADIOLOGIQUES DANS LES INSTALLATIONS	DÉFENSE EN PROFONDEUR
7 ACCIDENT MAJEUR	Rejet majeur de matières radioactives avec des effets considérables sur la santé et l'environnement exigeant la mise en œuvre des contre-mesures prévues, voire plus.		
6 ACCIDENT GRAVE	Rejet important de matières radioactives exigeant probablement la mise en oeuvre des contre-mesures prévues.		
5 ACCIDENT AYANT DES CONSÉQUENCES ÉTENDUES	Rejet limité de matières radioactives exigeant probablement la mise en œuvre de certaines des contre-mesures prévues • Plusieurs décès radio-induits.	Endommagement grave du coeur du réacteur • Rejet de grandes quantités de matières radioactives dans l'installation avec une probabilité élevée d'exposition importante du public. Ceci pourrait résulter d'un accident de criticité ou d'un incendie majeur.	
4 ACCIDENT AYANT DES CONSÉQUENCES LOCALES	Rejet mineur de matières radioactives n'exigeant probablement pas la mise en œuvre de contre-mesures prévues autres que la surveillance des aliments locaux • Au moins un décès radio-induit.	Fusion ou endommagement du combustible provoquant le rejet de plus de 0,1 % de la radioactivité du cœur • Rejet de quantités importantes de matières radioactives dans l'installation avec une probabilité élevée d'exposition importante du public.	
3 INCIDENT GRAVE	Exposition dépassant dix fois la limite annuelle réglementaire pour les travailleurs • Effets sanitaires déterministes non létaux (brûlures, par exemple) radio-induits.	Débits d'exposition de plus de 1 Sv/h dans une zone de travail • Contamination grave d'une zone censée ne pas être contaminée de par sa conception, avec une faible probabilité d'exposition importante du public.	Accident évité de peu dans une centrale nucléaire avec défaillance de toutes les dispositions en matière de sûreté • Perte ou vol de sources scellées de haute activité • Erreur de livraison d'une source scellée de haute activité, sans procédures adéquates pour y faire face.
2 INCIDENT	Exposition d'un membre du public dépassant 10 mSv • Exposition d'un travailleur dépassant les limites annuelles réglementaires.	Intensité de rayonnement dans une zone de travail dépassant 50 mSv/h • Contamination importante dans une zone d'une installation censée ne pas être contaminée de par sa conception.	Défaillances importantes des dispositions en matière de sûreté, sans conséquences réelles • Découverte d'une source scellée orpheline, d'un appareil ou d'un colis de haute activité sans défaillance des dispositions en matière de sûreté • Emballage incorrect d'une source scellée de haute activité.
1 ANOMALIE			Surexposition d'un membre du public dépassant les limites annuelles réglementaires • Problèmes mineurs liés aux composants de sûreté, avec maintien d'une solide défense en profondeur • Perte ou vol d'une source, d'un appareil ou d'un colis de faible activité.
0 ÉCART	AUCUNE IMPORTANCE DU POINT DE VUE DE LA SÛRETÉ		

Fig. 35 - Description de l'échelle INES.

D Échelle MSK (1964)

I	secousse non ressentie, mais enregistrée par les instruments
II	secousse partiellement ressentie, notamment par des personnes au repos et aux étages
III	secousse faiblement ressentie, balancement des objets suspendus
IV	secousse largement ressentie dans et hors les habitations, tremblement des objets
V	secousse forte, réveil des dormeurs, chûte d'objets, parfois légères fissures dans les plâtres
VI	légers dommages, parfois fissures dans les murs, frayeur de nombreuses personnes
VII	dégâts, larges lézardes dans les murs de nombreuses habitations, chûtes de cheminées
VIII	dégâts massifs, les habitations les plus vulnérables sont détruites, presque toutes subissent des dégats importants
IX	destructions de nombreuses constructions, quelquefois de bonne qualité, chûte de monuments et de colonnes
X	destruction générale des constructions, même les moins vulnérables (non parasismiques)
XI	catastrophe, toutes les constructions sont détruites (ponts, barrages, canalisations enterrées...)
XII	changement de paysage, énormes crevasses dans le sol, vallées barrées, rivières déplacées...

Fig. 36 - Échelle MSK donnée sur le site l'IRSN.

E Carte des séismes de référence par zone sismotectonique.

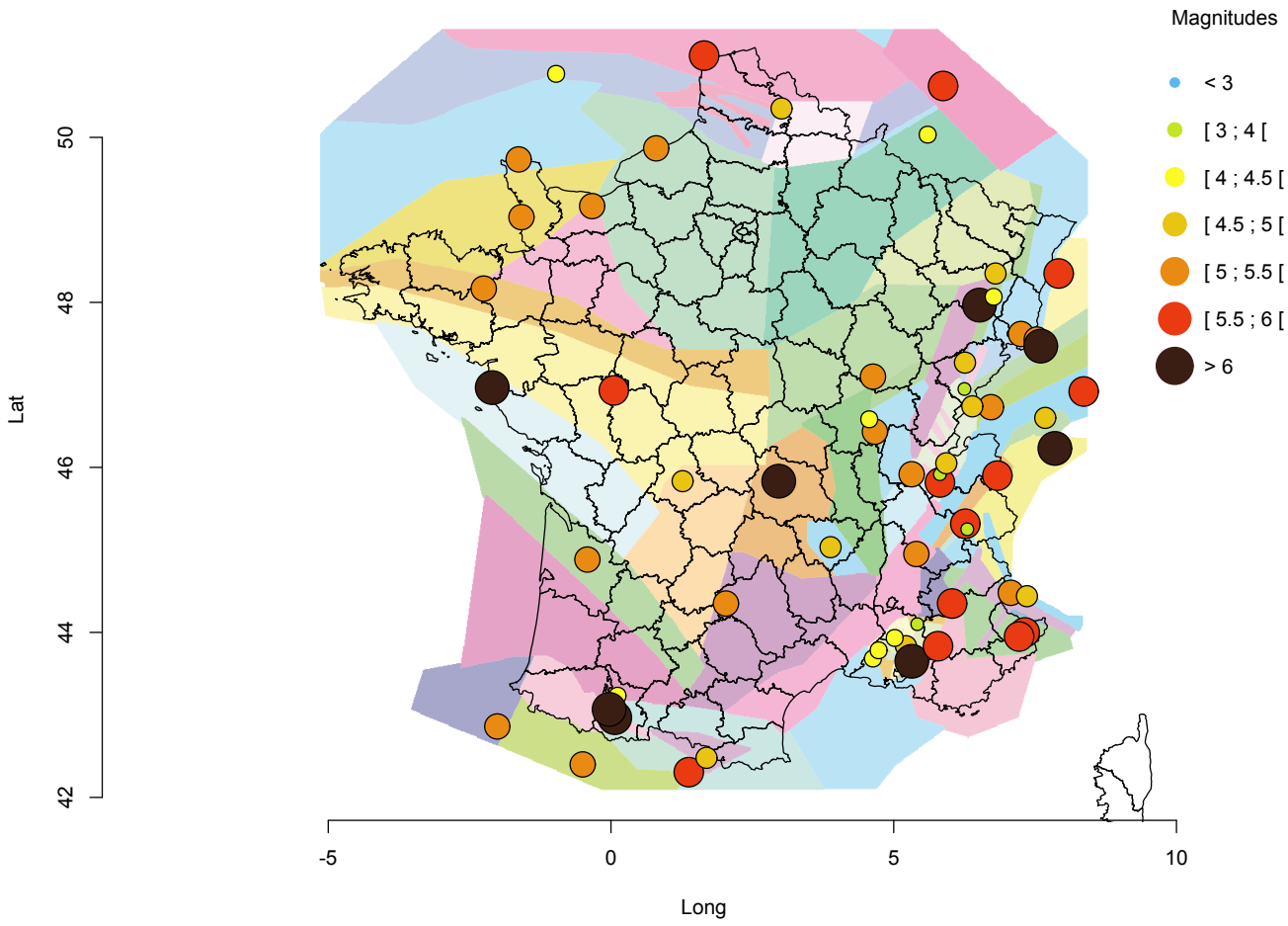


Fig. 37 - Carte des séismes de M_w maximale par zone sismotectonique.

F Table des résultats de la procédure d'estimation du seuil

u	$N(u)$	*p-value*	Statistique CvM	$\hat{\beta}$	$\hat{\xi}$
0,1	47962	0,0128	0,189	0,0445	0,2118
0,105	42857	0,0183	0,175	0,0458	0,2093
0,11	38376	0,0356	0,1493	0,0472	0,2058
0,115	34507	0,0453	0,1407	0,0484	0,204
0,12	31074	0,0926	0,1139	0,0497	0,2005
0,125	28121	0,0542	0,1339	0,0507	0,2001
0,13	25432	0,1775	0,0902	0,0522	0,1959
0,135	23100	0,1916	0,0878	0,0533	0,1944
0,14	20996	0,4113	0,0602	0,0546	0,1908
0,142	**20218**	**0,4718**	**0,0552**	**0,0552**	**0,189**
0,145	19140	0,4018	0,0611	0,0559	0,188
0,15	17479	0,2181	0,0834	0,0572	0,1849
0,155	16064	0,2096	0,0845	0,0577	0,1885
0,16	14741	0,1397	0,0993	0,0587	0,1878
0,165	13514	0,1137	0,1073	0,0599	0,1849
0,17	12482	0,0356	0,1507	0,0604	0,1897
0,175	11429	0,103	0,1109	0,0623	0,1815
0,18	10540	0,0718	0,1245	0,0633	0,1803
0,185	9745	0,0408	0,1461	0,0643	0,1797
0,19	9042	0,0105	0,1991	0,0648	0,1832
0,195	8334	0,0401	0,1467	0,0665	0,1764
0,2	7700	0,102	0,1116	0,0682	0,1706

Tab. 25 - Table des résultats de la procédure de recherche du seuil pour un pas de 0,005.

G Résultat de l'estimation des paramètres de la loi de coût économique

Les lois testées pour modéliser les données de coût d'accidents nucléaire sont les suivantes :

Loi de Burr

La distribution de Burr de paramètres de forme α et γ, et d'échelle θ a pour distribution

$$f(x) = \frac{\alpha\gamma(x/\theta)^\gamma}{x[1+(x/\theta)^\gamma]^{\alpha+1}}$$

pour tout $x > 0$, $\alpha > 0$, $\gamma > 0$ et $\theta > 0$.

Loi Pareto

La loi de Pareto de type II (ou Lomax) est un cas particulier de la loi de Burr lorsque $\gamma = 1$. Elle a pour distribution

$$f(x) = \frac{\alpha\theta^\alpha}{(x+\theta)^{\alpha+1}}$$

pour tout $x > 0$, $\alpha > 0$ et $\theta \in \mathbb{R}$.

Loi Log-normale

La loi Log-normale de paramètres μ et σ a pour densité

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}}\, e^{-\frac{(\ln x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

pour tout $\mu \in \mathbb{R}$ et $\sigma > 0$

La table ci-dessous présente les résultats de l'estimation des paramètres des trois lois par maximum de vraisemblance, ainsi que leur intervalle de confiance percentile à 95% obtenu par *Bootstrap* paramétrique (voir 4.3.4).

Paramètres	Estimateur	IC (95%)
	Burr	
$\hat{\alpha}$	0,43	[0,18 ; 1,01]
$\hat{\gamma}$	1,29	[0,86 ; 2,45]
$\hat{\theta}$	17,98	[7,19 ; 65,62]
	Pareto	
$\hat{\alpha}$	0,61	[0,43 ; 1,03]
$\hat{\theta}$	26,15	[11,69 ; 67,16]
	Log-normale	
$\hat{\mu}$	4,25	[3,72 ; 4,77]
$\hat{\sigma}$	2,32	[1,88 ; 2,68]

Tab. 26 - Estimation des paramètres par EMV et intervalle de confiance percentile (95%) associé.

les intervalles de confiance sont assez larges autour des estimateurs. En particulier pour le paramètre d'échelle θ de la loi de Burr et de Pareto. Ce fait est principalement dû aux deux valeurs extrêmes (Tchernobyl et Fukushima) qui peuvent modifier considérablement l'estimation des paramètres selon s'ils sont tirés ou non lors du ré-échantillonage. Remarquons que les paramètres de forme $\hat{\alpha}$ des lois de Burr et de Pareto sont inférieurs à un et donc l'espérance de ce risque est infinie. En substance, cela signifie que ce risque n'est pas assurable.

Liste des figures

Fig. 1 Carte du statut des ratifications (CP 1960) d'après l'OCDE au 30/07/2015. 16

Fig. 2 Carte du statut des ratifications (CV 1963) d'après l'OCDE au 27/01/2014. 21

Fig. 3 Schéma récapitulatif de la situation actuelle en France. 24

Fig. 4 Schéma du mécanisme de *fronting*. Source : www.insurancespeaker-wavestone.com. 27

Fig. 5 Schéma du mécanisme de *fronting* dans le cadre du placement d'une police Nucléaire. 28

Fig. 6 Schéma du fonctionnement du Pool Assuratome. 29

Fig. 7 Schéma du mécanisme de souscription directe du SYBAN. 31

Fig. 8 Déformation du millieu selon le type d'onde : source seismes-ondes.joueb.com. 34

Fig. 9 Accélération au sol mesurée par deux stations proches et reposant sur deux types de sols différents. 35

Fig. 10 Carte du zonage sismotectonique de l'IRSN (2006). 38

Fig. 11 Carte simplifiée des régions sismotectoniques françaises. 39

Fig. 12 Exemple de déplacement des séismes vers le site de Paluel. 40

Fig. 13 Illustration du séisme de Lisbonne de 1755 ($M_w \approx 9$) par João Giama Ströberle (1760). 41

Fig. 14 Schéma des distances épicentrale et hypocentrale. 43

Fig. 15 Représentation de l'hypocentre et de l'épicentre d'un séisme. 43

Fig. 16 Exemple simple de *raster* généré sous R de taille 3×3 soit 9 pixels. . . 45

Fig. 17 Carte étalon de la France représentée dans le système RGF93. 46

Fig. 18 Superposition de l'image et de la carte étalon dans le système RGF93. 48

Fig. 19 Superposition de l'image et de la carte étalon dans le système WGS84. 48

Fig. 20 Correction des pixels de la carte des régions sismotectoniques en trois phases. À gauche, les pixels à corriger se situent entre deux zones sismotectoniques. À droite les pixels à corriger sont entourés d'une unique zone. 50

Fig. 21 Carte des régions sismotectoniques finale après traitement et géocodage de l'image. 51

Fig. 22 Translation des séismes de référence vers la centrale nucléaire de Fessenheim. 53

Fig. 23 Distribution M_l : Détermination de la magnitude de complétude par la méthode *MAXC*. 63

Fig. 24 À Gauche : Ajustements de la loi de Gutenberg-Richter à la fonction de répartition empirique pour $\hat{\beta}^{MCO}$ et $\hat{\beta}^{EMV}$; À droite : *b-value* et intervalle *BCa* correspondant. 65

Fig. 25 À gauche : Diagramme quantile-quantile (*QQ-plot*) ; À droite : Diagramme probabilité-probabilité (*PP-plot*). 66

Fig. 26 Schéma récapitulatif des étapes de simulation pour le calcul du *PGA*. . 71

Fig. 27 À gauche : Fonction de répartition empirique complète du *PGA* ; À droite : Fonction de répartition empirique du *PGA* à partir du quantile 99,5%. Distribution obtenue à partir de 12,5 millions d'années simulées. 72

Fig. 28 (1) : Carte officielle de l'aléa sismique de la France ; (2) : Carte de l'aléa sismique réalisée dans DOMINIQUE et ANDRE [2012] ; (3) : Extrait de la carte d'aléa sismique créee à partir du catalogue SHARE. 74

Fig. 29 *Mean Excess Plot* de la distribution de *PGA*. La droite verticale rouge montre l'approximation visuelle du seuil à choisir. 79

Fig. 30 À gauche : Évolution de la statistique du test en fonction du seuil. $u \in [0,1; 0,2]$; À droite : *Mean Excess Plot*, la droite vertical rouge montre le seuil retenu par la procédure. 80

Fig. 31 Adéquation de la *GPD* à la fonction de répartition empirique des excès 81

Fig. 32 Estimation des coûts médians d'un accident nucléaire de niveau 6 et 7 en France : Source IRSN. 85

Fig. 33 Ajustements des lois Log-normale, de Burr et de Pareto à la fonction de répartition empirique. À gauche : représentation jusqu'à 1 Mrd€ ; À droite : distribution complète. 91

Fig. 34 À gauche : Diagramme quantile-quantile (*QQ-plot*) ; À droite : Diagramme probabilité-probabilité (*PP-plot*). 91

Fig. 35 Description de l'échelle INES. 101

Fig. 36 Échelle MSK donnée sur le site l'IRSN. 102

Fig. 37 Carte des séismes de M_w maximale par zone sismotectonique. 103

Liste des tableaux

Tab. 1 Capacité d'Assuratome par branche au 1er janvier 2016 (34 membres). DM : Dommage ; AP : Assurance de personne. L'acceptation désigne la capacité liée aux risques acceptés en Quote-Part des autres Pools du nucléaire étrangers. 28

Tab. 2 Correspondance *PGA* échelle de Mercalli modifiée. 36

Tab. 3 table des conversions M_w vers M_l. 45

Tab. 4 Sous-catalogue obtenu pour l'étude du risque sismique sur le site de Fessenheim. 52

Tab. 5 Accélération maximale du sol pouvant être atteinte conformément à la réglementation sur le site de Fessenheim. 54

Tab. 6 Résultat de l'estimation de la *b-value* par MCO ; intervalles de confiance percentile et *BCa* réalisés à partir de 5000 échantillons *Bootstrap*. 64

Tab. 7 Résultat de l'estimation de la *b-value* par EMV ; intervalles de confiance percentile et *BCa* réalisés à partir de 5000 échantillons *Bootstrap*. 64

Tab. 8 Résultat de l'estimation de la *b-value* pour le seuil 3,9. 65

Tab. 9 Troncature de la magnitude (M_l) de loi la Gutenberg-Richter propre à chaque zone sismotectonique. 68

Tab. 10 Paramètres de loi de Poisson de chaque zone sismotectonique. 70

Tab. 11 Valeur de *PGA* en fonction de différentes périodes de retours. 73

Tab. 12 Table comparative du *PGA* pour une période de retour de 475 ans. . 75

Tab. 13 Résultat de la procédure pour le seuil retenu : $u = 0,142$. 80

Tab. 14 Découpage en classes de dommages obtenu à partir de l'exemple de l'IAEA. Les numéros correspondent aux classes de risque ci-dessus. . . 83

Tab. 15 Découpage en classes de dommages après le retrait de la classe (1). . . 83

Tab. 16 Classes (5) et (6) : Scénarios et intervalles de coût. 86

Tab. 17 Classes (4) : Scénarios et intervalle de coût. 87

Tab. 18 Classes (2) (3) unifiées : Scénarios et intervalle de coût. 88

Tab. 19 Segmentation du coût total pour la classe (5) et (6). 89

Tab. 20 Table récapitulative des classes de coût en fonction du *PGA*. 89

Tab. 21 Statistiques descriptives de la base de données (*en M€*). 90

Tab. 22 Modélisation d'une loi de coût : Test de Cramér-Von Mises. 92

Tab. 23 Résultat du générateur de pertes pour 12,5 millions d'années simulées. 94

Tab. 24 Coût moyen annuel obtenu via le générateur. 94

Tab. 25 Table des résultats de la procédure de recherche du seuil pour un pas de 0,005. 104

Tab. 26 Estimation des paramètres par EMV et intervalle de confiance percentile (95%) associé. 105

Glossaire

ABAG : Association of Bay Area Governments, 36
AEN : Agence pour l'énergie nucléaire, 17
ASN : Autorité de sûreté nucléaire, 12
BLUE : Best Linear Unbiased Estimator, 57
CCB : Convention complémentaire de Bruxelles, 18
CEA : Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, 14
CP : Convention de Paris, 15
CP : Groupement d'Intérêt Économique, 28
CPB : Ensemble formé par la Convention de Paris et la Convention Complémentaire de Bruxelles, 19
CvM : Cramér-Von Mises, 61
DTS : Droits de tirages spéciaux, 17
ELINI : European Liability Insurance for Nuclear Industry, 30
EMANI : European Mutual Association for Nuclear Insurance, 30
EMV : Estimateur du maximum de vraisemblance, 63
GPD : Generalised Pareto distribution, 37
GPD : Generalized Pareto Distribution 1984, 75
IAEA : International Atomic Energy Agency, 82
IRSN : Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, 12
LDG :Laboratoire de Détection Géophysique du Commissariat à l'énergie atomique français, 43
MCO : Estimateur des moindres carrés ordinaires, 63
MEF : Mean Excess Function, 78
MLG : Modèles linéaires généralisés, 36
NIRA : Nuclear Industry Reinsurance Association, 30
OCDE : Organisation de coopération et de développement économique, 17
PGA : Peak Ground Acceleration, 35
PNB : Produit national brut, 18
RGF93 : Réseau Géodésique Français 1993, 46
SYBAN : Syndicat Belge d'Assurances Nucléaires., 31
USGS : United States Geological Survey, 32
WGS84 : World Geodetic System 1984, 47
WNA World Nuclear Association, 75

Bibliographie

Articles et ouvrages

CORNELL, C. A., BANON, H. et SHAKAL, A. F. (1979). Seismic motion and response prediction alternatives. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 7(4):295–315.

DATA, T. K. (2010). *Seismic analysis of structures*. John Wiley & Sons.

DELIGNETTE-MULLER, M. L., DUTANG, C. *et al.* (2015). fitdistrplus : An r package for fitting distributions. *Journal of Statistical Software*, 64(4):1–34.

DOMINIQUE, P. et ANDRE, E. (2012). Probabilistic seismic hazard map on the french national territory. *In Proceedings of 12 world conference on earthquake engineering*.

DOST, B., EDWARDS, B. et BOMMER, J. (2016). *Local and moments magnitudes in the Groningen field. NAM*.

DOUGLAS, J. (2011). *Ground-motion prediction equations 1964-2010*. Pacific Earthquake Engineering Research Center Berkeley, CA.

D'AGOSTINO, R. B. et STEPHENS, M. A. (1986). Goodness of fit techniques.

EFRON, B. (1979). Bootstrap methods : another look at the jackknife. *Annals of Statistics*, 7(1):1–26.

EFRON, B. (1987). Better bootstrap confidence intervals. *Journal of the American statistical Association*, 82(397):171–185.

EMBRECHTS, P., KLÜPPELBERG, C. et MIKOSCH, T. (1997). Modelling extremal events, volume 33 of applications of mathematics.

GRÜNTHAL, G. et WAHLSTRÖM, R. (2012). The european-mediterranean earthquake catalogue (emec) for the last millennium. *Journal of seismology*, 16(3):535–570.

GRÜNTHAL, G., WAHLSTRÖM, R. et STROMEYER, D. (2009). The unified catalogue of earthquakes in central, northern, and northwestern europe (cenec)—updated and expanded to the last millennium. *Journal of Seismology*, 13(4):517–541.

GUTENBERG, B. et RICHTER, C. (1942). Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 32(3):163–191.

HANKS, T. et KANAMORI, H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research B*, 84(B5):2348–2350.

LAMM, V. (1998). The protocol amending the 1963 vienna convention. *Nuclear Law Bulletin*, 61:7–24.

MIGNAN, A. et WOESSNER, J. (2012). Estimating the magnitude of completeness for earthquake catalogs, community online resource for statistical seismicity analysis.

PICKANDS, J. (1975). Statistical inference using extreme order statistics. *the Annals of Statistics*, pages 119–131.

ROOTZÉN, H. et TAJVIDI, N. (1997). Extreme value statistics and wind storm losses : a case study. *Scandinavian Actuarial Journal*, 1997(1):70–94.

SOURIAU, A. (2006). Quantifying felt events : A joint analysis of intensities, accelerations and dominant frequencies. *Journal of Seismology*, 10(1):23–38.

SOVACOOL, B. K. (2008). The costs of failure : a preliminary assessment of major energy accidents, 1907–2007. *Energy Policy*, 36(5):1802–1820.

ZENTNER, I., NADJARIAN, A., HUMBERT, N. et VIALLER, E. (2008). Numerical calculation of fragility curves for probabilistic seismic risk assessment. *In Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, pages 12–17.

Conventions et textes juridiques

Convention de Paris

CONVENTION SUR LA RESPONSABILITÉ CIVILE DANS LE DOMAINE DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE (CONVENTION DE PARIS) DU 29 JUILLET 1960 AMENDÉE LE 28 JANVIER 1964 ET LE 16 NOVEMBRE 1982 ; Disponible sur : https://www.oecd-nea.org/law/nlparis_conv-fr.html

PROTOCOLE PORTANT MODIFICATION DE LA CONVENTION DU 29 JUILLET 1960 SUR LA RESPONSABILITÉ CIVILE DANS LE DOMAINE DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE, AMENDÉE PAR LE PROTOCOLE ADDITIONNEL DU 28 JANVIER 1964 ET PAR LE PROTOCOLE DU 16 NOVEMBER 1982 ; Disponible en français p. 39 - 49 sur : https://www.oecd-nea.org/law/paris_convention.pdf

Convention complémentaire de Bruxelles

CONVENTION DU 31 JANVIER 1963 COMPLÉMENTAIRE À LA CONVENTION DE PARIS DU 29 JUILLET 1960, AMENDÉE PAR LE PROTOCOLE ADDITIONNEL DU 28 JANVIER 1964 ET PAR LE PROTOCOLE DU 16 NOVEMBRE 1982 ; Disponible sur : https://www.oecd-nea.org/law/nlbrussels-fr.html

CONVENTION DU 31 JANVIER 1963 COMPLÉMENTAIRE À LA CONVENTION DE PARIS DU 29 JUILLET 1960 SUR LA RESPONSABILITÉ CIVILE DANS LE DOMAINE DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE, AMENDÉE PAR LE PROTOCOLE ADDITIONNEL DU 28 JANVIER 1964, PAR LE PROTOCOLE DU 16 NOVEMBRE 1982 ET PAR LE PROTOCOLE DU 12 FÉVRIER 2004 (Texte consolidé officieux de la convention complémentaire de bruxelles incorporant les dispositions des trois protocoles d'amendement susvisés) ; Disponible sur : https://www.oecd-nea.org/law/nlbfr/nlb-75/021-033_SUPP.pdf

Convention de Vienne

CONVENTION DE VIENNE DU 21 MAI 1963 RELATIVE À LA RESPONSABILITÉ CIVILE EN MATIÈRE DE DOMMAGES NUCLÉAIRES ; Disponible sur : https://www.oecd-nea.org/law/vienna-convention-fr.pdf

PROTOCOLE D'AMENDEMENT DE LA CONVENTION DE VIENNE RELATIVE À LA RESPONSABILITÉ CIVILE EN MATIÈRE DE DOMMAGES NUCLÉAIRES ; Disponible en français p. 39 - 49 sur : https://www.oecd-nea.org/law/1997-protocol-amend-vienna-convention-fr.pdf

Autre Convention

CONVENTION DE VIENNE SUR LE DROIT DES TRAITÉS DE 1969 Disponible sur : https://treaties.un.org/doc/Publication/UNTS/Volume%201155/volume-1155-I-18232-French.pdf

Droit français

Section 1 : Dispositions applicables à compter de l'entrée en vigueur du protocole portant modification de la convention de Paris, signé à Paris le 12 février 2004 (Légifrance) : https://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do?idSectionTA=LEGISCTA000025110866

Section 2 : Dispositions applicables jusqu'à l'entrée en vigueur du protocole portant modification de la convention de Paris, signé à Paris le 12 février 2004 (Légifrance) : https://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do?idSectionTA=LEGISCTA000025110918

Autre texte juridique

CONSEIL DE L'UNION EUROPÉENNE. *Décision du Conseil du 8 mars 2004 autorisant les États membres qui sont parties contractantes à la convention de Paris du 29 juillet 1960 sur la responsabilité civile dans le domaine de l'énergie nucléaire à ratifier, dans l'intérêt de la Communauté européenne, le protocole portant modification de ladite convention, ou à y adhérer* ; Journal officiel n° L 097 du 08/03/2004 p. 0053 - 0054. Disponible sur : http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32004D0294

Sites internet

Pages internet utilisées

Avis sur le rapport RESONANCE relatif au risque sismique sur le site de Fessenheim : http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/40/109/40109459.pdf

Réglementation parasismique applicable aux sites nucléaire français (site de l'IRSN) : http://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires.aspx#.V8RoFhQ2CQs

Risque de défaillance d'éléments importants pour la protection en cas de séisme (site de l'ASN) : http://www.asn.fr/Controler/Actualites-du-controle/Avis-d-incident-des-installations-nucleaires/Risque-de-defaillance-d-elements-importants-pour-la-protection-en-cas-de-seisme

A Methodology to Assess the Safety Vulnerabilities of Nuclear Power Plants against Site Specific Extreme Natural Hazards (site de l'IAEA) : https://gnssn.iaea.org/actionplan/Shared%20Documents/Action%2001%20-%20Safety%20Assessments/Methodology-to-Assess-the-Safety-Vulnerabilities_Nov2011.pdf

Autres sites

ASN : http://www.asn.fr/

IRSN : http://www.irsn.fr/FR/Pages/Home.aspx

Légifrance : https://www.legifrance.gouv.fr

OCDE-AEN : https://www.oecd-nea.org

USGS : http://earthquake.usgs.gov

World Nuclear Association : http://www.world-nuclear.org

Supports de cours

PLANCHET, F. (2016) Modélisations Avancées en Assurance - Utilisation de la théorie des valeurs extrêms dans le contexte solvabilité 2. ISFA - Université Lyon 1.

ROBERT, C. (2016). Théorie des Valeurs Extrêmes. ISFA - Université Lyon 1.

SUQUET, C. (2008) Simulation (Agrégation Externe). P 18-21 - Université des Sciences et Technologies de Lille.