

ANALYSE DES ESTIMATIONS D'ALEA SISMIQUE SUR LE SITE KO2 RAPPORT D'EXPERTISE

Pierre-Yves Bard

Pour PRONY Resources

07/09/2022

TABLE DES MATIERES

1	OBJECTIFS DE CE RAPPORT D'EXPERTISE	1
2	METHODOLOGIE RETENUE POUR LA REVUE CRITIQUE DES ETUDES D'ALEA	2
2.1	APERÇU D'ENSEMBLE	2
2.2	SOURCES CONSULTÉES.....	2
2.2.1	<i>Etudes d'aléa</i>	<i>2</i>
2.2.2	<i>Sismicité et tectonique</i>	<i>2</i>
2.2.3	<i>Conditions de site et effets associés</i>	<i>4</i>
2.2.4	<i>Référentiels techniques</i>	<i>4</i>
3	ANALYSE DU MODELE PROBABILISTE ("PSHA") BRGM.....	5
3.1	MODELE DE SOURCE	5
3.1.1	<i>Catalogue de sismicité</i>	<i>5</i>
3.1.2	<i>Zones source</i>	<i>8</i>
3.1.3	<i>Modèles de récurrence</i>	<i>10</i>
3.1.4	<i>Traitement des incertitudes</i>	<i>14</i>
3.2	MODELE DE MOUVEMENTS DU SOL.....	15
3.2.1	<i>Type de mouvements (H - V).....</i>	<i>15</i>
3.2.2	<i>Sélection des GMPE (mouvements horizontaux)</i>	<i>15</i>
3.2.3	<i>Prise en compte des incertitudes épistémiques</i>	<i>16</i>
3.2.4	<i>Prise en compte des incertitudes aléatoires</i>	<i>17</i>
3.3	LOGICIEL DE CALCUL	18
4	CONDITIONS DE SITE ET EFFETS DE SITE	19
4.1	CONDITIONS DE SITE SOUS L'OUVRAGE	19
4.1.1	<i>Géologie.....</i>	<i>19</i>
4.2	EFFETS POTENTIELS ASSOCIES	21
4.2.1	<i>Paramètres géophysiques (sismiques) et géotechniques</i>	<i>22</i>
4.2.2	<i>Conséquences potentielles</i>	<i>24</i>
5	RESULTATS	27
5.1	COURBES D'ALEA	27
5.2	SPECTRES UHS	29
5.3	DESAGREGATION	30
5.3.1	<i>Aléa Courte période / haute fréquence (PGA).....</i>	<i>31</i>
5.3.2	<i>Aléa Longue période / basse fréquence : SA (1 s).....</i>	<i>34</i>
5.4	ETUDES DE SENSIBILITE (BRGM2015).....	35
5.4.1	<i>Délimitation des zones sources.....</i>	<i>36</i>
5.4.2	<i>Sismicité locale et lois de récurrence locales.....</i>	<i>36</i>
5.4.3	<i>Sensibilité à M_{max}</i>	<i>37</i>
5.4.4	<i>Sensibilité à M_{min}.....</i>	<i>37</i>
5.4.5	<i>Sensibilité aux GMPE</i>	<i>37</i>
5.4.6	<i>Spectres CMS</i>	<i>37</i>
5.5	ACCELEROGRAMMES	38
5.5.1	<i>Sélection / scenarii.....</i>	<i>38</i>
5.5.2	<i>Recommandations</i>	<i>39</i>
6	CONCLUSIONS "TECHNIQUES" DE L'ANALYSE CRITIQUE DES ESTIMATIONS D'ALEA	41
6.1	MODELES DE SOURCE	41
6.1.1	<i>Point d'enjeu majeur : Caractéristiques de la sismicité locale</i>	<i>41</i>
6.1.2	<i>Autres points susceptibles d'amélioration</i>	<i>41</i>
6.2	MODELE DE MOUVEMENTS DU SOL.....	42
6.2.1	<i>Composante du mouvement.....</i>	<i>42</i>
6.2.2	<i>GMPE utilisées.....</i>	<i>42</i>
6.2.3	<i>Variabilité aléatoire</i>	<i>43</i>
6.3	TYPE DE RESULTATS.....	43
6.3.1	<i>Sensibilité à la version logicielle.....</i>	<i>43</i>

6.3.2	Moyenne / médiane	43
6.3.3	UHS / CMS.....	43
6.3.4	Mode de sélection et d'ajustement spectral des accélérogrammes	44
6.4	SITE	44
6.5	LISTE RECAPITULATIVE DES RECOMMANDATIONS SUR LE MODELE D'ALEA	45
7	REPONSE AUX DEUX QUESTIONS	47
7.1	QUESTION 1 : QUEL EST L'ALEA SISMIQUE ACTUEL DE LA REGION DANS LAQUELLE SONT IMPLANTEES LES INSTALLATIONS DE L'USINE DU SUD ?.....	47
7.1.1	Définition de l'aléa sismique.....	47
7.1.2	Niveau de l'aléa sismique au rocher de référence.....	47
7.1.3	Conditions de site et effets associés	48
7.2	QUESTION 2 : DANS LE FUTUR, PEUT-ON S'ATTENDRE A UNE AUGMENTATION DE L'INTENSITE SISMIQUE RESSENTIE EN NOUVELLE-CALÉDONIE ET SPECIFIQUEMENT DANS LE GRAND SUD, A QUELLE ECHEANCE ?.....	48
8	REFERENCES.....	50
9	LISTE DES ACRONYMES UTILISES	54

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte de sismicité instrumentale de la Nouvelle-Calédonie extraite de Pillet & Pelletier (2005). Séismes du NEIC (en rouge) et de Louat (1977, en vert), de Regnier (1999, en jaune) et la crise de janvier 2005 (en bleu).	4
Figure 2 : Relations de conversion de magnitude utilisées dans les études d'aléa récentes sur le Sud-Ouest Pacifique. En haut, études du BRGM uniquement (m_b-M_w et M_s-M_w , relations identiques pour les études 2015 et 2021) ; En bas : toutes études confondues, m_b-M_w à gauche et M_s-M_w à droite.	8
Figure 3 : Zonages en "aires" utilisés dans les études BRGM 2015 et 2021. En haut zones crustales superficielles, en bas zones plus profondes associées à la subduction. A gauche, zonage BRGM de 2008 et à droite zonage utilisé dans SRC2014. (Extrait des rapports BRGM 2015 et 2021).....	9
Figure 4 : Aperçu 3D de la structure géologique superficielle au site de l'ouvrage (extrait du rapport MC-21-301–PRNC–01-R103).....	19
Figure 5 : Localisation de certaines coupes de référence par rapport à l'ouvrage (haut) et variations d'altitude du toit du bedrock (bas). Extrait du rapport MC-21-301–PRNC–01-R103	20
Figure 6 : Coupes géologiques transverses à l'ouvrage, du Nord (C700) vers le Sud (C500), et coupe longitudinale sous l'ouvrage (bas). La localisation des coupes transverses est indiquée sur la Figure 5. Extrait du rapport MC-21-301–PRNC–01-R103.	21
Figure 7 : Synthèse des mesures de V_s pour les différentes formations de l'ouvrage K02 (Figures C1 et C2 extraites de la référence REF 41-27708-000-CI-RPT-000020 - Rev A, p.48). En haut : Profils de vitesse $V_s(z)$ en fonction de la profondeur, avec un code couleur correspondant aux différentes formations. En bas : évolution de V_s avec la pression verticale effective. Codes formations : C = "croûte de surface" "ferricrete" ; D = latérites transportées et redéposées ; E = latérites jaunes et rouges, sols résiduels en place ; F = "zone de transition", G = saprolite, de G1 saprolite terreuse à G3 saprolite "très rocheuse" / toit des péridotites ; H = bedrock de péridotites saines.	23
Figure 8 : Courbes d'aléa pour trois périodes spectrales (0, 0.2 et 1.0 s de haut en bas) proposées pour le Sud de Grande-Terre dans différentes études récentes : BRGM2015 en noir (moyenne en trait plein, fractiles 15% et 85% en tireté), BRGM2021 en vert (moyenne en trait plein, fractiles 15% et 85% en pointillé), SRC2014 en rouge (site VNC-KO4-FELS3) et JPS2021 en magenta (site de Nouméa, moyenne en trait plein, fractiles 15% et 85% en pointillé). Pour 0.2 s et 1.0 s, l'étude JPS2021 ne fournit les valeurs d'aléa que pour les deux périodes de retour 500 et 2500 ans (probabilités annuelles 0.002 et 0.0004, respectivement)	28
Figure 9 : Spectres UHS obtenus pour le sud de Grande-Terre à 500 ans (haut) et 10000 ans (bas) de période de retour dans différentes études récentes : BRGM2015 en noir (moyenne en trait plein, fractiles 15% et 85% en tireté), BRGM2021 en vert (moyenne en trait plein, fractiles 15% et 85% en pointillé), et SRC2014 en rouge (site VNC-KO4-FELS3). La courbe en tireté magenta correspond à une extrapolation du spectre UHS 2500 ans donné dans JPS2021 pour le site de Nouméa l'extrapolation a été faite avec un exposant de -3 pour la loi puissance des courbes d'aléa, à toutes les périodes spectrales.....	29
Figure 10 : Comparaison des spectres UHS moyen (trait plein) et médian (trait pointillé), obtenus pour une période de retour de 10000 ans dans les études BRGM2015 (noir) et BRGM2021 (vert).....	30
Figure 11 : Contributions des différentes zones considérées dans les études BRGM2015 (à gauche) et BRGM2021 (à droite) à la courbe d'aléa pour une période spectrale de 0 s (PGA) au site KO2	31
Figure 12 : Désagrégation de l'aléa courte période (PGA) pour l'étude BRGM 2015 à 500 ans (haut) et 10000 ans (bas), et pour chacun des deux zonages considérées (BRGM2015 à gauche et SRC2014 à droite) ..	32
Figure 13 : Résultats de désagrégation du PGA pour l'étude SRC2014 : contribution de chacune des zones à l'aléa total en haut, contributions des différents couples (magnitude-distance) pour une période de retour de 500 ans (milieu) et 10000 ans (en bas).	33
Figure 14 : Résultats de la désagrégation en (magnitude-distance-epsilon) pour le PGA à Nouméa dans l'étude JPS2021, pour une période de retour de 500 ans	34
Figure 15 : Contributions des différentes zones considérées dans les études BRGM2015 (à gauche) et BRGM2021 (à droite) à la courbe d'aléa pour une période spectrale de 1s au site KO2	34

Figure 16 : Désagrégation de l'aléa à une période spectrale de 1s pour l'étude BRGM 2015 à 500 ans (haut) et 10000 ans (bas), et pour chacun des deux zonages considérés (BRGM2015 à gauche et SRC2014 à droite)	35
Figure 17 : Modèles de récurrence en taux surfaciques pour les zones locales R2 et RB considérés dans les études BRGM et SRC2014, sous forme d'une relation de Gutenberg-Richter tronquée représentée sur l'intervalle (M_{min} , M_{max})	37
Figure 18 : Répartition distance - magnitude des accélérogrammes retenus dans les études BRGM2015 et 2021	39
Figure 19 : Comparaison entre spectres UHS (trait plein) et CMS (trait pointillé) à 10000 ans de période de retour, pour les études SRC2014 (rouge) et BRGM2015 (noir). Dans le premier cas, la période de conditionnement est 0 s (PGA), dans le second c'est 1,2 s (période supposée de l'ouvrage)	40

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Catalogues de sismicité utilisés dans les études BRGM et les autres études récentes sur le Sud-Ouest Pacifique	6
Tableau II : Algorithmes de declustering utilisés dans les études BRGM et conséquences sur le nombre d'événements considérés comme indépendants dans le catalogue	10
Tableau III : Périodes de complétude (et méthodes utilisées) dans les études d'aléa récentes sur la région Sud-Ouest Pacifique	12
Tableau IV : Magnitudes maximales considérées dans les zones contrôlant l'aléa dans les rapports BRGM et les études d'aléa récentes sur la région Sud-Ouest Pacifique	12
Tableau V : Pente des lois de récurrence Gutenberg-Richter obtenues pour les zones contrôlant l'aléa dans les rapports BRGM et les études d'aléa récentes sur la région Sud-Ouest Pacifique	13
Tableau VI : Liste des GMPE considérées dans les différentes études analysées (classées en fonction de leur domaine d'application et de leur année de publication). Les cellules sont en blanc lorsque chacune des GMPE a été considérée dans une branche de l'arbre logique ; les cellules sont en grisé lorsque la GMPE finalement utilisée est la moyenne pondérée de celles considérées.	16
Tableau VII : Caractéristiques dynamiques prises en compte pour les premiers calculs dynamiques sur le projet Lucy - FEL3 (Certaines, notamment les vitesses V_s , ont cependant été modifiées pour les dernières études en cours)	22
Tableau VIII : Liste des accélérogrammes de base retenus dans les études BRGM2015 et BRGM2021	38
Tableau IX : Liste récapitulative des améliorations possibles sur le modèle d'aléa, avec indications sur leur temporalité (court, moyen ou long terme), une hiérarchisation en priorité, ainsi que les conséquences probables sur le niveau de l'aléa (lorsque cela est possible)	46

1 Objectifs de ce rapport d'expertise

L'objectif de l'expertise en cours est de donner un avis sur les estimations d'aléa sismique au site KO2 de Nouvelle-Calédonie telles que fournies dans les deux rapports BRGM 2015 et 2021, et notamment de répondre aux 2 questions suivantes :

"Le premier objectif de la prestation est la réalisation d'une revue critique de l'ensemble des données, études et expertises en lien avec ce sujet et fournies par Prony Resources et/ou les autorités de tutelle compétentes.

Cette contre-expertise définira si les données et études déjà réalisées permettent de répondre aux questions ci-après et si elles répondent aux meilleurs standards disponibles.

- Si oui, l'étude doit proposer les réponses aux questions à partir des données existantes.
- Dans le cas contraire, un point d'étape doit être fait entre Prony Resources, les services techniques de la DIMENC et le prestataire. Celui-ci établira des recommandations permettant de répondre pleinement aux problématiques. La suite à donner à ces recommandations fera l'objet de concertations entre Prony Resources et les services techniques de la DIMENC."

Questions auxquelles elle devra répondre :

- Quel est l'aléa sismique actuel de la région dans laquelle sont implantées les installations de l'Usine du Sud ?
- Dans le futur, peut-on s'attendre à une augmentation de l'intensité sismique ressentie en Nouvelle-Calédonie et spécifiquement dans le Grand Sud, à quelle échéance ?"

Après une présentation de la méthodologie de travail adoptée pour cette expertise, dont la sélection de plusieurs publications ou documents proposant des estimations d'aléa sismique sur la région un peu plus large des îles du Sud-Ouest Pacifique, ce rapport propose une analyse des différentes composantes de l'étude d'aléa sismique effectuée par le BRGM pour le site KO2 (modèles de source et de mouvements du sol), à la lumière de l'état de l'art et/ou de la pratique actuels et des options prises dans les autres études similaires. Il inclut ensuite une discussion de la composante "effets de site", non explicitement abordée dans les estimations d'aléa du BRGM, mais prise en compte en aval dans l'étude de stabilité de la digue, dont le mode de traitement peut cependant influencer notablement sur l'estimation de l'aléa sismique. Ces éléments éclairent l'analyse comparative des résultats fournis par les différentes études disponibles, en termes de niveaux d'aléa à différentes périodes de retour, de désagrégation et de proposition d'accélérogrammes temporels pour une analyse dynamique non-linéaire de l'ouvrage. L'identification des points les plus influents sur les niveaux d'aléa estimés, conduit à un certain nombre de recommandations sur quelques points d'attention particuliers pour lesquels la combinaison entre incertitudes et sensibilité affecte la réponse aux deux questions posées.

2 Méthodologie retenue pour la revue critique des études d'aléa

2.1 Aperçu d'ensemble

Une estimation probabiliste d'aléa sismique ("PSHA") en un site donné comporte plusieurs éléments :

- une analyse de la sismicité établissant les taux de récurrence par tranche de magnitude pour toutes les sources sismiques (concentrées sur des failles bien identifiées, ou plus distribuées spatialement) susceptibles d'affecter le site considéré (composante communément appelée "modèle de source")
- la quantification des mouvements vibratoires au site associés à ce modèle de sismicité, en fonction de la magnitude et de la distance des événements sismiques ("modèle de mouvements du sol"), et éventuellement aussi des conditions géologiques spécifiques du site
- la convolution de ces deux composantes pour obtenir les probabilités annuelles de dépassement pour différents niveaux d'amplitude du mouvement sismique, et y associer des signaux temporels permettant une analyse dynamique non-linéaire de l'ouvrage

Compte tenu de la technicité de ces estimations, l'approche suivie pour répondre aux 2 questions s'est décomposée en deux étapes principales, une première essentiellement analytique pour analyser point par point les différentes composantes de l'étude, y compris les données et les hypothèses correspondantes, et une seconde plus synthétique pour mettre en relation l'aléa ainsi estimé, sous ses différentes formes (spectrale et temporelle à différentes périodes de retour) aux différentes hypothèses plausibles, et identifier les sources majeures d'incertitudes affectant la réponse aux questions posées. Plus spécifiquement, la partie analytique s'est appuyée sur la démarche suivante :

- Analyse du traitement de ces différentes composantes dans l'étude du BRGM pour le site KO2, à la lumière tant de "l'état de l'art" et de "l'état de la pratique", que des référentiels reconnus en France et/ou dans cette région du Pacifique Sud-Ouest.
- Consultation d'autres documents ou publications sur la même thématique (évaluation de l'aléa dans le Sud-Ouest Pacifique) ou bien sur certaines composantes particulières (sismicité, géodynamique actuelle, ...) et analyse comparative avec les éléments pris en considération dans les études BRGM
- Échanges d'une part avec certains scientifiques locaux donnant un éclairage sur le contexte géodynamique et sismo-tectonique régional (Sud-Ouest Pacifique) et local (Grande-Terre et environs immédiats), et d'autre part avec les ingénieurs et scientifiques du BRGM ayant réalisé les études de 2015 et de 2021 pour clarifier certains points techniques
- Une attention particulière à la composante "effets de site", non explicitement abordée dans les estimations d'aléa du BRGM, mais prise en compte en aval dans l'étude de stabilité de l'ouvrage

2.2 Sources consultées

2.2.1 Etudes d'aléa

A côté des études spécifiques du BRGM pour la Nouvelle-Calédonie, à savoir celle, générale, de 2008 (Bertil et al., 2008), puis les deux pour l'ouvrage KO2 de 2015 et 2021 (Bertil et al., 2015 ; Hoste-Colomer & Bertil, 2021), plusieurs autres ont trait soit à un autre ouvrage situé lui aussi dans le Sud de Grande-Terre (Dimas & Cuthbertson, 2014 ou "SRC2014"), soit à des études plus larges visant à estimer l'aléa dans plusieurs autres îles plus ou moins proches du Sud-Ouest Pacifique. Parmi ces dernières, une seule donne directement l'aléa pour Grande-Terre, celle de Johnson et al. (2021), référencée en abrégé par "JPS2021", qui donne les courbes d'aléa pour Nouméa. Les autres (Suckale & Grünthal, 2009, ou "SG2009" ; Rong et al., 2012 ou "Rea2012" ; Petersen et al., 2012 ou "USGS2012") se focalisent sur des archipels plus sismiques situés soit plus à l'Est (Vanuatu, Samoa, Fidji), soit plus au Nord-Ouest (Papouasie Nouvelle Guinée, Solomon, etc.) ; néanmoins, certaines composantes de ces analyses sont intéressantes à titre comparatif.

2.2.2 Sismicité et tectonique

N'ayant jamais personnellement travaillé sur l'aléa sismique en Nouvelle-Calédonie, j'ai jugé utile et nécessaire de prendre contact avec des scientifiques locaux pour mieux connaître le contexte géodynamique, sismo-tectonique et sismologique local. Comme indiqué dans mon offre de prestation, cet échange s'est fait par l'intermédiaire d'O. Monge (Service Géologique de Nouvelle-Calédonie), au travers de plusieurs téléconférences, les premières en bilatéral, et la dernière le 19/12/2021 avec plusieurs intervenants : O. Monge, J. Collot (Service Géologique NC), M. Patriat (Ifremer) et R. Sutherland (Université

de Wellington, NZ), responsable d'une campagne sismologique temporaire effectuée récemment dans le Sud de Grande-Terre. Les quelques lignes qui suivent résument ma compréhension de ces échanges et de la littérature scientifique qu'ils m'ont fournies ; elles ont été relues par quelques-uns de ces spécialistes de sciences de la Terre, et la présente version inclut leurs corrections.

D'un point de vue structural, la Nouvelle-Calédonie se trouve à l'extrémité nord d'une vaste zone appelée Zealandia (Mortimer et al., 2017), et n'est pas une limite de plaque active depuis la mise en place de la nappe d'ophiolite à la fin de l'Éocène (-34 Ma, Aitchison et al., 1995) : ces nappes d'ophiolites qui couvrent tout le sud de la Grande Terre, surmontent des roches sédimentaires plus anciennes datant du Crétacé supérieur au Paléogène (-98 à -55 Ma), surmontant elles-mêmes un socle datant du Paléozoïque supérieur au Mésozoïque (Paris, 1981 ; Maurizot et al., 2020b). Les nappes et le socle ont ensuite été affectées par des failles normales ou décrochantes à forte inclinaison, que divers auteurs (Lagabrielle et al., 2005 ; Collot et al., 2017 ; Patriat et al., 2018 ; Tournadour et al., 2021) attribuent à des processus isostatiques post-obduction.

Pour ce qui concerne la géodynamique régionale actuelle, les principaux éléments contrôlant les zones de subduction très actives situées à l'Est (Vanuatu-Loyauté, Fidji-Tonga) sont revus de manière synthétique dans Schellart et al. (2006), Matthews et al. (2015) et Collot et al. (2020). Dans l'ensemble, ces éléments généraux sont bien pris en considération dans toutes les études d'aléa. Pour ce qui concerne plus particulièrement l'aléa en Nouvelle-Calédonie, compte tenu de la distance, les détails importent moins que les grandes lignes.

Il existe par ailleurs plusieurs études qui se sont focalisées plus particulièrement sur le contexte sismo-tectonique du Grand-Sud de la Nouvelle Calédonie, dégageant deux grands processus distincts :

- Une influence "à distance" de la subduction des Vanuatu, et notamment le début de la collision de la ride des îles Loyauté induisant (a) une flexure lithosphérique affectant l'ensemble de la plaque plongeante à l'Ouest de cette collision et (b), peut-être, un réseau de failles actives en lien direct avec le blocage lié à la ride (Dubois, 1974 ; Launay and Recy, 1972 ; Launay, 1985 ; Cabioch, 1988 ; Cabioch et al., 1996)
- Une tectonique spécifique associée à un rebond isostatique après la phase d'obduction ayant conduit à la mise en place de la nappe de péridotites à la fin de l'Eocène (-34 Ma), rebond associé à l'érosion progressive de cette nappe et/ou son étalement gravitaire, et conduisant à un réseau de failles normales ayant structuré toute la Grande-Terre et ses marges (Lagabrielle et al., 2005 ; voir aussi Chardon & Chevillotte, 2006 ; Lagabrielle et al., 2008 ; Collot et al., 2008 ; Collot et al., 2017 ; Patriat et al., 2018 ; Tournadour et al., 2021 ; Sevin et al., 2020). Les mouvements verticaux cumulés associés à ce rebond sont estimés de l'ordre de 1 km, ce qui est significatif. La question de leur continuation à l'ère actuelle est ouverte, mais les données géodésiques récentes montrent des mouvements verticaux non négligeables de la Grande Terre (Ballu et al., 2019, GJI), jusqu'à -4 cm/an sur les marges. Les mouvements verticaux de surrection attendus sur la chaîne restent inconnus.

En parallèle, les éléments spécifiques de la sismicité de Grande-Terre et de ses environs immédiats sont présentés dans différentes publications utilisant des réseaux permanents ou temporaires (Louat, 1977 ; Régnier et al., 1999 ; Pillet & Pelletier, 2005, cf. Figure 1). Une autre campagne temporaire a été menée récemment (2018-2019) dans le sud de Grande-Terre, et ses résultats font l'objet d'un article récemment soumis pour publication (Chin et al., 2022 ; Sutherland, communication personnelle). Ces études indiquent une sismicité superficielle particulière sous la Grande Terre, plus active que la sismicité régionale de la partie nord-est de la plaque australienne, et qui apparaît associée, au moins géographiquement, à la nappe de péridotites, avec un découpage de cette nappe en différents panneaux. Ces publications focalisées sur la sismo-tectonique locale suggèrent donc la possibilité d'individualiser une zone source particulière, d'extension limitée dans la partie Sud de Grande-Terre, associée à cette tectonique particulière, et avec des taux de récurrence potentiellement différents des zones voisines.

Si on fait l'hypothèse que les taux d'occurrence de cette sismicité temporaire peuvent être extrapolés à plus longue période de retour, les estimations d'aléa pourraient être significativement impactées à la hausse. Cette campagne temporaire (Chin et al., 2022) a aussi mis en évidence au moins un cas de sismicité locale (Mw autour de 4) déclenchée par un fort séisme lointain de subduction, séisme qui reste masqué dans les catalogues mondiaux en raison de son occurrence dans la coda d'un gros événement. Cela met en évidence une possibilité de sous-estimation de la sismicité locale modérée, et la nécessité d'un réseau local de qualité.

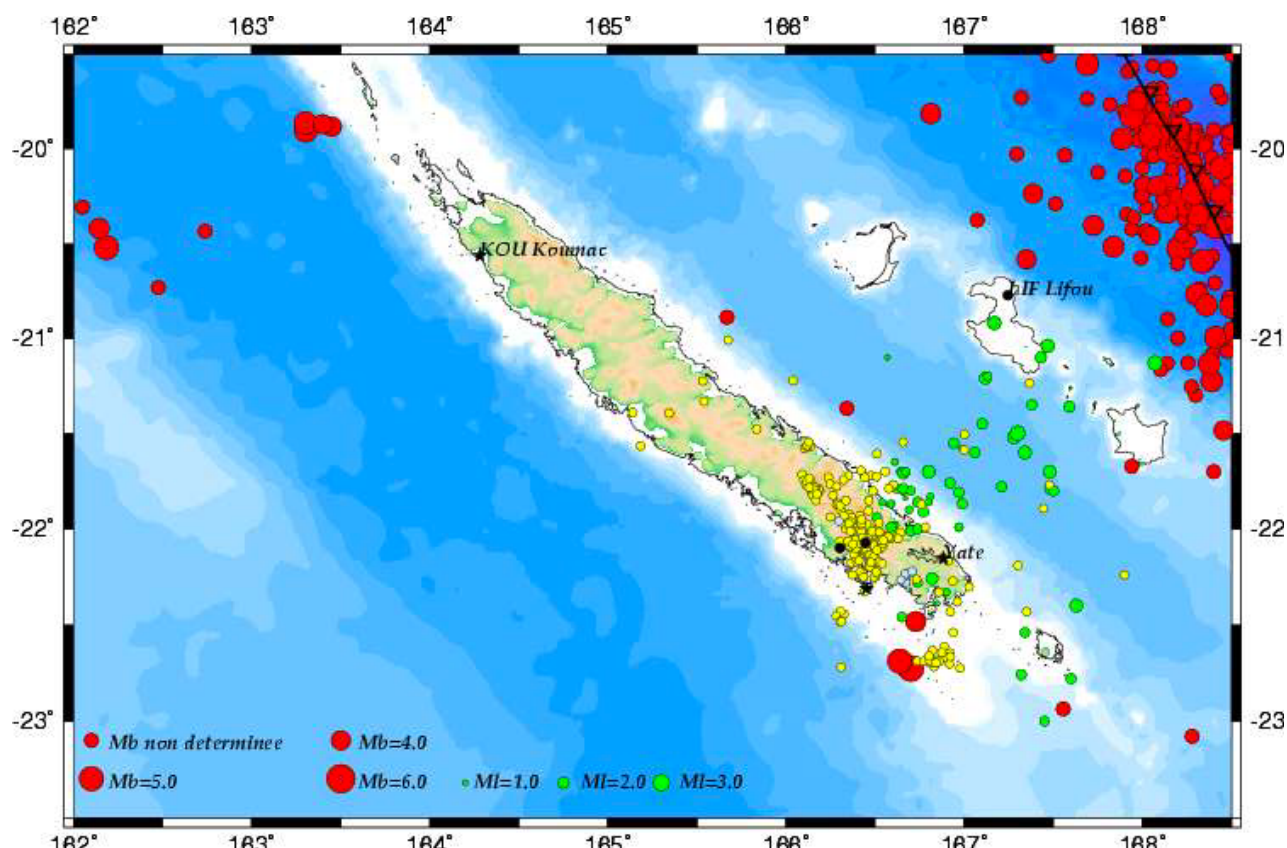


Figure 1 : Carte de sismicité instrumentale de la Nouvelle-Calédonie extraite de Pillet & Pelletier (2005). Séismes du NEIC (en rouge) et de Louat (1977, en vert), de Regnier (1999, en jaune) et la crise de janvier 2005 (en bleu).

2.2.3 Conditions de site et effets associés

Cet aspect n'étant pas explicitement abordé dans les études BRGM, qui n'estiment l'aléa que pour un "rocher standard", l'analyse s'est appuyée sur les informations géologiques, géophysiques et géotechniques recueillies pour l'analyse de stabilité de l'ouvrage, mises à disposition via les rapports MECATER référencés MC-21-301-PRNC-01-R103, REF 0171783848 Rev0, REF 1781012-009-R-Rev1, REF MC-18-146-VNC-03-R06, REF H354600-1000-220-230-2001_A1, REF 41-27708-000-CI-RPT-000020-Rev A, REF MC-20-197-VAL-04-R02-F, et REF MC-21-301-PRNC-01-R104.

2.2.4 Référentiels techniques

Les référentiels ayant permis de cadrer tant l'analyse des études existantes que les recommandations finales sont au nombre de 4 :

- Le bulletin n° 48 de la Commission Internationale sur les Grands Barrages ("ICOLD 2014"), exposant les recommandations sur les moyens d'estimer les mouvements sismiques pour le dimensionnement des grands barrages
- Le document "Risque sismique et sécurité des ouvrages hydrauliques" (Octobre 2014), rédigé par un groupe de travail *ad hoc* "Barrages et Séismes" pour le compte de la DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques, Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie).
- Le Cahier Technique n° 44 publié en 2021 par l'AFPS (Association Française de Génie Parasismique), se présentant comme un "Guide pour la conception des cahiers des charges relatifs aux études d'aléa sismique en cohérence avec l'arrêté du 15/02/2018 applicable aux ICPE".
- Le document "ANCOLD2019" présentant les recommandations de l'ANCOLD (Comité National Australien sur les Grands Barrages) pour le dimensionnement parasismique des barrages.

Les deux premiers sont essentiellement des documents de cadrage général, tandis que les deux derniers sont des guides plus techniques donnant beaucoup de précisions sur les méthodes d'estimation pratiques de l'aléa sismique pour un site de barrage.

3 Analyse du modèle probabiliste ("PSHA") BRGM

3.1 Modèle de source

3.1.1 Catalogue de sismicité

3.1.1.1 Sources utilisées

Il n'existe pas, ni pour la France métropolitaine, ni pour la région concernée de catalogue "officiel" couplant les sismicités historique et instrumentale qui fasse référence. Dès lors, chaque étude d'aléa sur la région reprend les informations existantes dans différentes bases de données en libre accès, et en fait la synthèse au mieux, mais avec une certaine variabilité d'une étude à l'autre en fonction des bases retenues, des seuils de magnitude retenus, des priorités données pour les valeurs de magnitude ou de localisation pour les événements figurant dans différentes bases de données, et des relations utilisées pour l'harmonisation des magnitudes.

Le Tableau I liste les sources de données utilisées dans les études du BRGM, ainsi que dans les quelques autres études d'aléa sur le Sud-Ouest Pacifique, dont notamment les deux études appliquées directement à Grande-Terre (SRC2014 et JPS2021). Dans chaque cas, et notamment celui des études BRGM, les priorités dans la sélection des paramètres (localisation, magnitude) en fonction des bases de données utilisées sont bien documentées.

- La première étude BRGM (2008) ne fait appel qu'aux catalogues "mondiaux" : les données 1964-2002 du catalogue ISC ont été complétées pour la période 2003-2005 par celles du catalogue USGS/NEIC ; les données antérieures (1903-1963) de l'ISC n'ont pas été prises en compte dans cette première étude en raison de l'imprécision de localisation, du caractère très approximatif des magnitudes indiquées et du fort risque d'incomplétude sur cette zone essentiellement marine éloignée des réseaux de surveillance existant à l'époque. Ce jeu de données ne comporte que des magnitudes supérieures ou égales à 4.
- L'étude BRGM2015 a considéré la sismicité sur une zone d'extension plus réduite (163-170.8° E au lieu de 153.5 - 177° E, 18.7-25.9° S au lieu de 14-28° S), mais en élargissant la fenêtre de temps pour les données ISC (outre les données antérieures à 1963, la date de l'étude a permis de considérer les données ISC jusqu'en 2014, soit au total 7891 événements de magnitude ≥ 4), et d'autre part en l'enrichissant des informations tirées de différents autres catalogues mondiaux (en principe assez homogènes) et régionaux
 - Celles du catalogue ISC-GEM (Weatherill et al., 2016), qui ne comprend aucun "nouveau" séisme, mais présente l'avantage de donner des valeurs de M_w relativement fiables et homogènes pour le sous-ensemble d'événements avec $M_w \geq 5.5$ sur la période 1901-2009, soit 331 séismes dont 35 sur la période 1900-1963
 - Celles du catalogue GCMT Harvard qui donne des estimations de M_w pour les événements de $M_w \geq 5$ (558 en tout)
 - Le catalogue régional IRD, établi sur la base des enregistrements obtenus par des stations sur Grande Terre et quelques îles environnantes, à partir essentiellement de 1993. La configuration de ce réseau de surveillance a évolué assez notablement sur cette période avec une modification sensible en 2007 (réseau commun NC/Vanuatu comprenant 7 stations, + quelques stations accélérométriques du réseau RAP). Ce catalogue a permis de rajouter plusieurs milliers de séismes de magnitude < 4 , mais qui n'ont finalement pas été exploités en raison de la difficulté d'estimer les périodes de complétude du fait des changements fréquents de configuration du réseau.
 - Après analyse, la liste des 15 événements historiques pré-1900 établie par Louat et Baldassari (1989) et/ou figurant dans la base macrosismique Sisfrance /Nelle-Calédonie n'a pas non plus été prise en compte en raison des imprécisions de localisation et de magnitude.
- La mise à jour BRGM2021 a essentiellement inclus une consolidation des informations ISC des séismes de la période 06/2012 à 06/2014 (remplacement de localisations et magnitude préliminaires par des localisations et magnitudes "définitives"), et la prise en compte des séismes survenus dans la période 06/2014 à 06/2021, soit 1258 (26%) séismes supplémentaires avec $M_w \geq 4$ (pourcentage se réduisant cependant assez significativement lorsqu'on ne considère que la sismicité locale, cf plus loin § 3.1.2).

- Le catalogue utilisé dans SRC2014 est un catalogue développé en interne par Lowell Whiteside en 2009 pour Fugro William Lettis & Associates, Inc.. Il n'est pas directement disponible et aucun détail n'est donné sur les données d'origine (hormis que les sources sont multiples, avec un seuil inférieur de magnitude à 3.5 et une période allant de 1900 à 2009).
- Celui utilisé dans JPS2021, aux objectifs géographiques beaucoup plus étendus, est le catalogue ISC-GEM (Weatherill et al., 2016) correspondant à la période 1900-2014. Du coup il n'y a a priori plus besoin d'utiliser de relations de conversion de magnitude.
- Celui utilisé dans USGS2012 couvre aussi une zone très vaste et provient de la fusion de 3 sources : ISC, USGS, et Engdahl & Villasenor (2002).
- Celui utilisé dans SG2009 pour leur étude d'aléa au Vanuatu est établi à partir du catalogue USGS-NEIC (http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic_rect.html) jusqu'à fin 2003, complété par Engdahl et al. (1998) (784 événements complémentaires sur un total de 7519).
- Celui utilisé dans Rea2012 est établi à partir de la fusion de 3 catalogues : PAGER-CAT 1900-2009 (Allen et al., 2009) ; relocalisations selon Engdahl et al. (1998) pour la période 1964-2004 ; et catalogue assemblé par Geoscience Australia pour la période 1958-2009 (<http://www.ga.gov.au/earthquakes/searchQuake.do>).

Tableau I : Catalogues de sismicité utilisés dans les études BRGM et les autres études récentes sur le Sud-Ouest Pacifique

	Zone géographique	Catalogues mondiaux							Catalogues locaux ou régionaux			Nombre d'événements
		ISC	USGS/NEIC	ISC-GEM (Storchak et al., 2009 ; Mw≥5.5)	GCMT Harvard	Engdahl (2018)	PAGER-CAT	Autres	IRD Instrumental	IRD historique	Geoscience Australia	
BRGM 2008	14-28° S - 153.5-177°E	1964-2002	2003-2005									
BRGM 2015	18.7 - 25.9° S / 163-170.8°E	1901-2012 (M≥4), très incomplet avant 1963	2013-2014	→Mw	(Mw≥5)				(forte proportion de M<4)	Louat Baldassarri 1989-1843-1900		11257, dont 6500 avec Mw≥4
BRGM 2021	Idem	1901-2021 ?	Même chose qu'en 2015 (?)						Non précisé			7728 séismes avec Mw≥ 4
SG2009	Vanuatu et alentours 11-22° S 164-172° E		X (→ 2003)			x						7519
USGS2012	Samoa - Vanuatu 9-35° S 165° E-165° W	1907-2008	1973-2010			1900-2002 (Engdahl & Villasenor, 2002)						
Rea2012	Îles Sud-Ouest Pacifique					x	X (1900-2009)				x	
SRC2014	Sud Grande-Terre							Fugro 1900-2009, Mw ≥ 3.5				
JPS2021	Îles Sud-Ouest Pacifique 4° N-45° S 145° E-160° W			x								110000 (Mw > 2.8)

3.1.1.2 Homogénéisation en magnitude de moment M_w

L'étude BRGM 2008 a utilisé les relations de conversion de Lamarre et al (1988)

- Conversion $M_S - M_w$
 $M_w = 0.7 M_S + 1.8$ pour $M_S \leq 6$,
 $M_w = M_S$ pour $6 < M_S \leq 8$,
 $M_w = 8.5$ pour $M_S \geq 8$ (aucun cas)
- Conversion $M_b - M_w$
 $M_w = m_b$ pour $m_b \leq 5.0$,
 $M_w = (m_b - 5)/0.6 + 5.0 = 1.67 m_b - 3.33$ pour $5 < m_b \leq 6.2$,
 M_w étant directement donné dans le catalogue USGS-NEIC pour $m_b > 6.2$

Les études BRGM 2015 et 2021 utilisent des relations de conversion plus récentes, celles de Giacomo et al. (2013) :

- $M_w = 0.67 M_S + 2.13$ pour $M_S \leq 6.47$
- $M_w = 1.10 M_S - 0.67$ pour $6.47 \leq M_S$
- $M_w = 1.38 m_b - 1.79$

Ces conversions sont formellement différentes, mais conduisent à des écarts limités (maximum de 0.2, mais non homogène sur toute la gamme de magnitude) comme indiqué sur la Figure 2, qui illustre cependant l'existence d'incertitudes sur les estimations de magnitude. L'impact de ces incertitudes sur l'estimation des taux de récurrence n'est pas abordé dans les rapports d'étude (par exemple, les évolutions inverses des deux types de conversion peuvent conduire à un certain biais sur l'estimation des pentes des courbes de Gutenberg-Richter, avec de plus fortes valeurs en 2015 et 2021 qu'en 2008, cf plus loin le § 3.1.3). Interrogés sur ce point, les responsables de l'étude estiment que l'impact devrait être limité en raison de l'étendue des zones et de la largeur de l'intervalle de magnitude considéré ($\delta m = 0.5$). Cela est probable, mais cela constitue un a priori très répandu dans la communauté, que certains aimeraient voir confirmer par des analyses quantitatives intégrant explicitement plusieurs catalogues élaborés différemment.

Les autres études d'aléa listées plus haut sur la région Pacifique-Sud utilisent aussi des relations de conversion de magnitude pour l'homogénéisation en magnitude de moment, elles sont listées ci-dessous et illustrées sur la Figure 2.

- SRC2014 : Rien n'est dit sur les conversions de magnitude
- JPS2021 : comme le catalogue ISC-GEM (Weatherill et al., 2016) contient déjà une estimation de la magnitude de moment, il n'y a plus besoin d'utiliser de relations de conversion de magnitude (des précisions sont données dans la référence d'origine sur les relations utilisées pour cette homogénéisation).
- Rea2012 utilise des relations de conversion de magnitude obtenues spécifiquement pour la région Pacifique Sud. Celles concernant M_S et m_b , indiquées ci-dessous, sont aussi illustrées sur la Figure 2 pour montrer la variabilité assez forte des conversions entre m_b et M_w :
 - $M_w = 0.8252 M_S + 1.2188$
 - $M_w = 0.7546 m_b + 1.7809$
- SG2009 utilise aussi des relations de conversion de magnitude spécifiques, obtenues directement à partir des données des catalogues utilisés lorsque plusieurs magnitudes sont indiquées pour un même événement. Elles sont indiquées ci-dessous et également illustrées sur la Figure 2.
 - $M_w = 1.2690 M_S - 1.0436$ (USGS-NEIC) Ou $M_w = 1.2765 M_S - 1.0825$ (Engdahl)
 - $M_w = 0.7813 m_b + 1.5175$ (USGS-NEIC) Ou $M_w = 0.7601 m_b + 1.6562$ (Engdahl)

On voit donc que les relations de conversions de magnitude peuvent être significativement différentes d'une étude à l'autre, avec des écarts approchant 1 tant pour les magnitudes modérées (relation $m_b - M_w$) que pour les fortes magnitudes (relation $M_S - M_w$). Cela introduit une incertitude significative sur les magnitudes des catalogues utilisés, incertitude pouvant rejaillir sur les distributions fréquence-magnitude et in fine les estimations d'aléa. La quantification de ces incertitudes serait utile, mais n'est explicitement indiquée dans aucune des études citées (ni pour les rapports BRGM ni pour les autres).

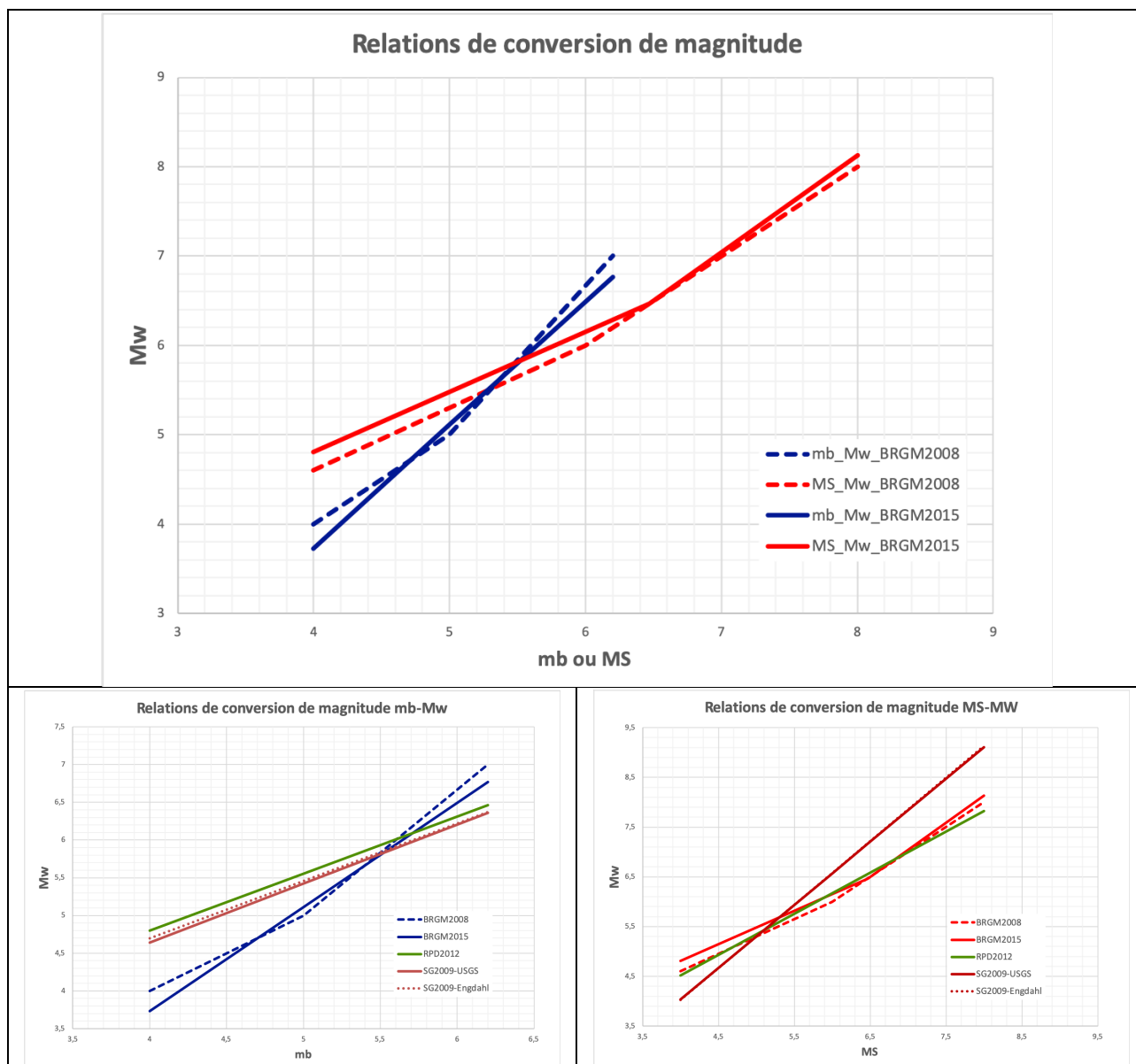


Figure 2 : Relations de conversion de magnitude utilisées dans les études d'aléa récentes sur le Sud-Ouest Pacifique. En haut, études du BRGM uniquement (mb-Mw et MS-Mw, relations identiques pour les études 2015 et 2021) ; En bas : toutes études confondues, mb-Mw à gauche et MS-Mw à droite.

3.1.2 Zones source

3.1.2.1 Type

Les études d'aléa probabilistes peuvent faire appel à différents types de "découpage en zones sources" : aires surfaciques / volumiques à l'intérieur desquelles la sismicité est supposée homogène en termes de répartition en fréquence et magnitude, failles caractérisées par leur localisation, orientation, pendage et taux et type d'activité. Les contours de ces aires ou failles sont délimités à partir de l'ensemble des connaissances géologiques, géophysiques, et sismiques, et peuvent varier d'une étude à l'autre.

D'autres types de modèles en "sismicité lissée" peuvent être utilisés, qui présentent l'avantage de ne pas nécessiter de découpage géographique, mais aussi l'inconvénient de ne reposer que sur la sismicité connue sans intégrer d'information complémentaire de nature géologique ou géophysique.

Dans les études du BRGM, seuls les premiers types de source (aires surfaciques / volumiques) ont été utilisés, ce qui est logique compte tenu de la faible longueur temporelle du catalogue de sismicité (qui rend l'approche en "sismicité lissée" très incertaine surtout pour la sismicité locale modérée), et de la distance

pluri hecto-kilométrique aux zones de subduction où éventuellement l'interface de subduction pourrait être explicitement pris en considération (comme cela est fait notamment dans Johnson et al. (2021)).

3.1.2.2 Contours

Alors que l'étude BRGM2008 ne prenait en compte qu'un seul zonage, celles de 2015 et 2021 en ont considéré deux, celui du BRGM2008, et celui de l'étude SRC2014. Les contours en sont précisés sur la Figure 3 pour la sismicité crustale superficielle (haut) et la sismicité plus profonde associée à la subduction (bas). On y voit que

- La sismicité de subduction (la plus forte) est au minimum à 200 km du site
- La zone dans laquelle est située le site est, dans les 2 zonages (R2 ou RB) , une zone extrêmement étendue du Nord au Sud-Est -, incluant la partie sud de Grande-Terre, mais aussi une très grande étendue marine où la sismicité est faible à modérée, très diffuse, et relativement mal localisée pour les événements modérés, avec de surcroît un seuil de détection variable en fonction de la position du séisme, en raison de la faible couverture instrumentale située seulement à terre.

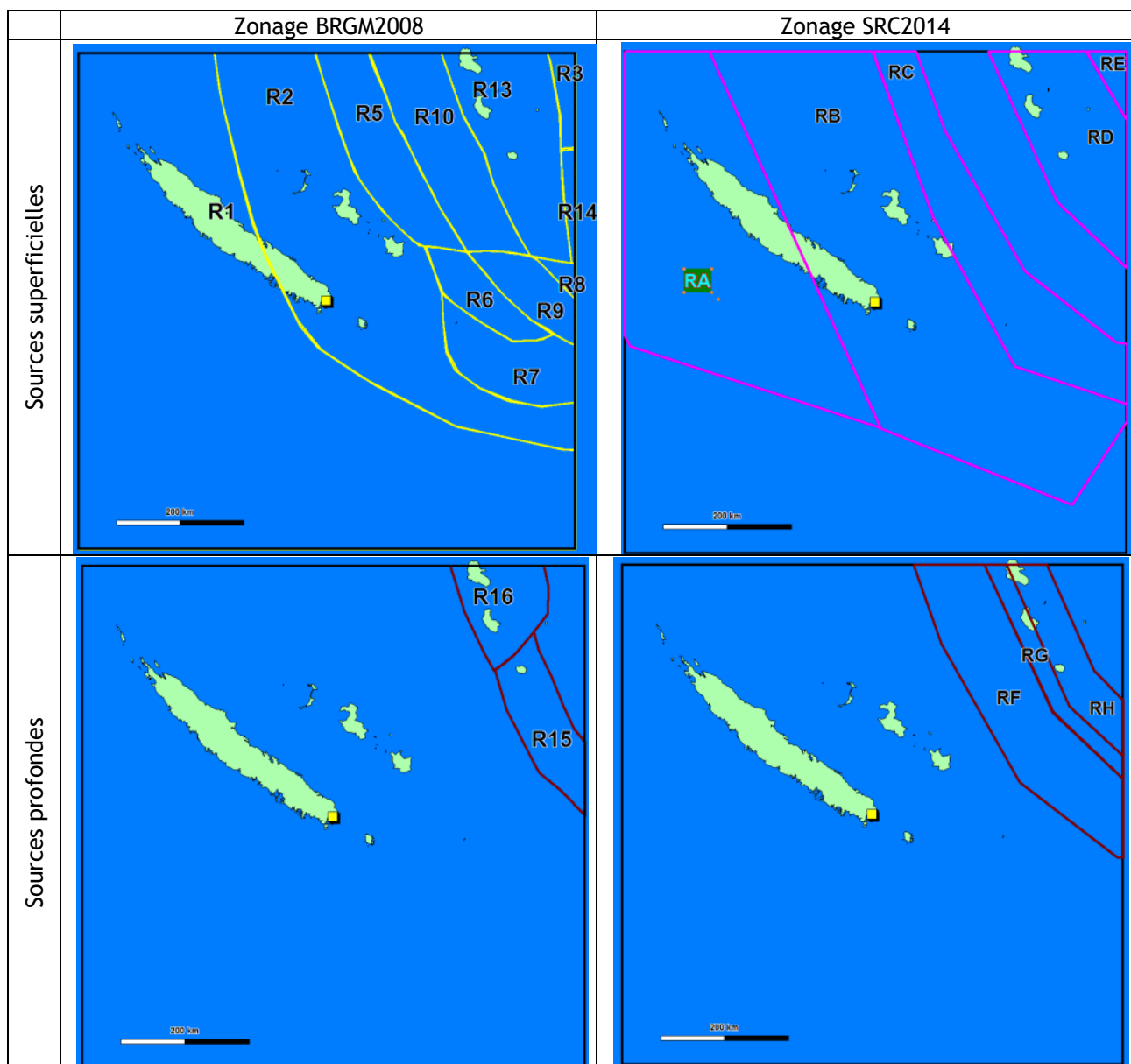


Figure 3 : Zonages en "aires" utilisés dans les études BRGM 2015 et 2021. En haut zones crustales superficielles, en bas zones plus profondes associées à la subduction. A gauche, zonage BRGM de 2008 et à droite zonage utilisé dans SRC2014. (Extrait des rapports BRGM 2015 et 2021)

Cela constitue à mon avis un point de discussion important pour chacune des études (BRGM et SRC2014), car, comme cela est très souvent le cas, et en particulier aussi pour le site KO2, l'analyse en désagrégation montre qu'à très longue période de retour (très faible probabilité annuelle), l'aléa est contrôlé, au moins à haute fréquence, par la sismicité locale. Il est dès lors généralement recommandé de faire des analyses plus serrées de la sismicité locale, conduisant éventuellement à des zones de dimensions plus réduites autour du site, ou à minima à justifier le choix de zones de grande extension. Ce point sera repris dans le chapitre de conclusions avec des recommandations associées.

3.1.3 Modèles de récurrence

Ces modèles établissent, pour chacune des zones (ou failles), les taux annuels de récurrence en fonction de la magnitude de l'événement. Pour les établir, il faut commencer par effectuer un prétraitement sur la sismicité de chaque zone (ou faille) telle que déduite du catalogue : on lui applique d'abord des algorithmes de "declustering" (dégrouper) visant à ne garder que les chocs principaux en éliminant les répliques ou même précurseurs, pour se rapprocher au mieux d'une occurrence poissonnienne (sans mémoire), et on analyse ensuite leur complétude par intervalle de magnitude, c'est-à-dire les périodes sur lesquelles la sismicité connue peut être considérée comme complète. C'est seulement alors que l'on peut évaluer de manière suffisamment robuste les taux de récurrence annuels, par ajustement des paramètres d'une distribution selon une forme fonctionnelle choisie a priori, mais dont le cœur est basé sur la loi-puissance de Gutenberg-Richter $\log(N) = a - bM$, où $N(M)$ est, pour la zone considérée, le nombre de séismes de magnitude supérieure ou égale à M , et borné vers les magnitudes supérieures par une magnitude maximale M_{\max} considérée comme indépassable pour la zone considérée.

3.1.3.1 Déclustering

L'objectif est donc de "filtrer" le catalogue brut initial pour ne garder que les choc principaux à occurrence (quasi-)poissonnienne, en éliminer les répliques et les éventuels précurseurs. La pratique actuelle pour ce filtrage des catalogues bruts utilise principalement deux types d'algorithmes, proposés initialement par Gardner & Knopoff (1974) ou Reasenber (1985), mais dont les paramètres peuvent être adaptés au cas par cas (Grünthal, 1985 ; Uhrhammer, 1986). Le concept est d'éliminer les "clusters" ou groupes spatio-temporels de séismes en ne gardant que l'événement principal de chaque "cluster" : les résultats vont dépendre de l'échelle de proximité dans le temps et l'espace que l'on se fixe pour qualifier deux événements de dépendants ou indépendants, ainsi que de la précision des localisations.

Les études du BRGM mentionnent initialement une précision de localisation de 25km en horizontal et 15 km en profondeur (étude de 2008), réduite ensuite à 10 km (2015). Celle de 2008 indique une assez forte sensibilité à l'algorithme en termes de nombre final de séismes indépendants finaux. La mise à jour de 2021 ne donne pas de précision particulière sur cet aspect, on peut supposer par défaut que l'option retenue est la même qu'en 2015.

Tableau II : Algorithmes de declustering utilisés dans les études BRGM et conséquences sur le nombre d'événements considérés comme indépendants dans le catalogue

Etude	Algorithme	Gardner Knopoff	Reasenber	Grünthal	Uhrhammer	Autre
BRGM2008	Nombre initial de séismes	24187 (toute la zone)				
	Nombre après filtrage	8101	19049	5016	15039	
BRGM2015				12403 après adaptation / réduction des paramètres spatio-temporels comme dans Suckale et al. (2005)		
BRGM2021				11240 (zone plus réduite) (dont 6507 avec $M_w \geq 4$)		
SG2009	Uniquement faible profondeur (0-60 km)		(x)	(x)		Musson 1999
REA2012			X			
SRC2014		Utilisation d'un declustering, mais sans précision complémentaire				
JPS2021					X	

L'option retenue in fine est de privilégier l'approche de Reasenber avec des paramètres spatio-temporels adaptés, permettant de garder in fine environ 50 à 60% des séismes du catalogue initial. Cette option paraît

légitime, mais il serait intéressant de voir explicitement quantifié l'impact de ce choix a minima sur le niveau d'incertitude des paramètres de récurrence (paramètres a ou $\lambda(5)$ et b / B de la loi de Gutenberg-Richter (cf plus bas § 3.1.3.4), et encore mieux sur l'estimation finale de l'aléa (moyenne et fractiles).

A titre informatif, le Tableau II indique aussi les algorithmes utilisés dans les autres études d'aléa sur la même région du Pacifique Sud-Ouest

- SG2009 indique que l'hypothèse d'une distribution poissonnienne peut être acceptée pour les séismes profonds (profondeur ≥ 60 km), et que donc le declustering n'est appliqué qu'aux séismes de profondeur inférieure, quel que soit leur type. L'algorithme est celui de Musson (1999) inspiré de Reasenber (1985) avec une méthode de détermination des fenêtres spatio-temporelles similaire à celle proposée par Grünthal, conduisant pour la sismicité du Vanuatu à des domaines spatio-temporels réduits de moitié par rapport au contexte continental européen.
- REA2012 mentionne simplement l'utilisation de l'algorithme de Reasenber (1985), sans autre précision
- SRC2014 se contente de mentionner l'utilisation de catalogues "dégrouvés" pour l'établissement des modèles de récurrence, mais sans aucune précision sur les algorithmes utilisés et les conséquences en termes d'aléa moyen ou d'incertitudes
- JPS2021 mentionne une très forte sensibilité aux paramètres de l'algorithme, et une forte réduction du nombre de séismes considérés comme indépendants. L'algorithme final utilisé est celui de Gardner et Knopoff (1974), mais avec des paramètres internes modifiés selon Uhrhammer (1986). De plus le declustering est fait séparément sur deux sous-ensembles de séismes, les profonds d'un côté et tous les autres de l'autre (càd crustaux, interface de subduction et peu profonds à l'intérieur de la plaque plongeante)

3.1.3.2 Complétude

Pour évaluer sans biais les fréquences annuelles par intervalle de magnitude, il faut au préalable identifier sur quelle période temporelle le catalogue peut être considéré comme complet. Cette analyse peut se faire soit par examen visuel (zone à pente stable sur la courbe montrant le nombre de séismes par intervalle de magnitude en fonction du temps), soit à partir de statistiques un peu plus sophistiquées mais reposant sur le même concept de régularité temporelle.

Dans l'idéal, ces périodes de complétude devraient être déterminées zone source par zone source, mais cela est souvent difficile dans les zones à sismicité modérée et/ou à faible couverture en raison du faible nombre de séismes.

Les études d'aléa du BRGM se sont appuyées sur une approche visuelle pour déterminer les périodes de complétude, en considérant l'ensemble du périmètre considéré dans chaque cas (sans détailler par zone), ce qui correspond à peu près à un rectangle de 400 km autour du site. Les autres études d'aléa sur le Sud-Ouest Pacifique ont pour l'essentiel suivi une approche visuelle similaire, sauf la plus récente (Johnson et al., 2021) qui a utilisé l'outil MBTK (Model Building ToolKit) mis en place dans le logiciel OpenQuake de la fondation GEM.

L'ensemble des informations et résultats est synthétisé dans le Tableau III. Il en ressort un assez bon accord pour considérer que le catalogue est complet depuis le début des années 1960 pour les magnitudes supérieures à 5.5, et le début du XXème siècle pour les magnitudes supérieures à 7-7.5. Des différences existent d'une étude à l'autre pour les magnitudes autour de 6, mais elles ne sont pas directement comparables puisque les zones considérées ne sont pas exactement les mêmes.

On peut noter aussi l'absence de résultats de complétude pour les magnitudes inférieures à 3, et la mention de résultats pour l'intervalle de magnitude entre 4 et 5 uniquement dans les études BRGM. Cela signifie que les courbes de récurrence sont déterminées sur des intervalles de magnitude peu étendus pour les zones à sismicité modérée (zones crustales à l'Est et à l'Ouest de la subduction), ce qui entraîne a priori des incertitudes plus fortes.

Tableau III : Périodes de complétude (et méthodes utilisées) dans les études d'aléa récentes sur la région Sud-Ouest Pacifique

Etude	Méthode		Période de complétude								
	type	zone	M≥4	4.5	4.75	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
BRGM2008	Visuelle	Pas de distinction entre zones sources	1995	1995	1980	1964					
BRGM2015	Visuelle		Incomplet	1995	1995	1963	1963	1961	1922	1901	
BRGM2021	Visuelle		Non précisé, sans doute identique à BRGM2015								
SG2009	Visuelle	Zone entière	Incomplet, non considéré				Complet pour M ≥ 5.2 depuis 1964				
USGS2012	Visuelle	Zone entière	Non précisé				Complet pour M ≥ 5.0 depuis 1964				
REA2012	Non précisé	Non précisé	Non précisé				Complet pour M≥5.3 depuis 1964				1900
SRC2014	Non précisé		Non indiqué								
JPS2021(*)	Outil MBTK GEM	Par groupe de zones	Non indiqué				1964	1950			1920

(*) les périodes de complétude indiquées pour JPS2021 correspondent à la zone où se trouve l'ouvrage, à savoir la zone répertoriée "z18" (cf Tableau 2 de Johnson et al., 2021).

3.1.3.3 Magnitude maximale

Dans chacune des zones sources considérées, la distribution des magnitudes est tronquée au-delà d'une "magnitude maximale" M_{\max} considérée comme une taille maximale physiquement indépassable. L'estimation de M_{\max} peut être faite soit en appliquant un incrément (généralement autour de 0.5 à 1.0) à la magnitude maximale observée, soit sur des bases plus géophysiques à partir d'une analyse des longueurs des failles actives, ou bien des magnitudes maximales observées ailleurs dans des contextes tectoniques similaires. De plus, compte tenu des incertitudes sur cette valeur, la tendance récente est de prendre en compte non pas une seule valeur scalaire, mais une distribution de valeurs maximales, distribution qui peut prendre plusieurs formes.

Tableau IV : Magnitudes maximales considérées dans les zones contrôlant l'aléa dans les rapports BRGM et les études d'aléa récentes sur la région Sud-Ouest Pacifique

Etude	Méthode	Mmax (zone locale / valeur)		Mmax par zone		Mmax (subduction)	
		Mmax (subduction proche peu profonde)		Mmax (subduction)			
BRGM2008	$M_{\max}(\text{Observé}) + 0.5$	R2	6.2	R7	8.2	R9	
BRGM2015 et BRGM2021	$M_{\max}(\text{Observé}) + 0.5$	R2	6.8	R9	8.6	R10	8.6
		RB	6.8	RC	7.5	RF	8.6
SG2009	$M_{\max}(\text{observé}) + \Delta$ $\Delta = 0.25, 0.5, 0.75$	1	6.55-6.8 - 7.05	6	7.35 - 7.6 - 7.85	6	7.65 - 7.9 - 8.15
USGS2012	Non précisé	Background	7.3		8.2		8.5-9.0
REA2012	Non indiqué						
SRC2014	Non précisé	RB	7.3	RC	7.7	(RF)	8.4
JPS2021	Failles : Leonard(2010)	-	-				
	Aires : $M_{\max}(\text{Observé}) + 0.5$	Z18	7.5	Z9	8.2	Z10	8.2

Dans le cas présent, seules des valeurs scalaires ont été prises en compte dans les études BRGM, alors que certaines autres études ont pris en compte une distribution discrète.

L'ensemble des valeurs retenues pour les zones contribuant le plus à l'aléa (zone source locale où est situé l'ouvrage, subduction proche et peu profonde, subduction profonde la plus proche) sont indiquées dans le Tableau IV, où on pourra noter que certaines informations restent non précisées pour certaines études. On y notera que les valeurs retenues pour la zone locale dans les rapports BRGM 2015 et 2021 sont dans la fourchette basse des valeurs considérées dans d'autres études, alors que c'est l'inverse pour la subduction proche peu profonde, et plutôt vers le centre de l'intervalle pour la subduction profonde.

Il convient cependant de noter que, en complément de la valeur de la magnitude maximale, il faut aussi prendre en considération pour une comparaison, la façon dont cette magnitude maximale est prise en compte dans la loi de récurrence ajustée (voir section suivante). Bien que cela ne soit pas explicitement

documenté dans les rapports d'étude BRGM, les échanges directs avec leurs auteurs (D. Bertil et R. Hoste-Colomer), ont permis de préciser la forme fonctionnelle "classique" de type exponentielle tronquée prise en compte (cf. § suivant).

3.1.3.4 Résultats

L'étape finale consiste à ajuster une loi de récurrence de type "Gutenberg-Richter" donnant le taux annuel de récurrence $\lambda(M)$ en fonction de la magnitude sous une forme générique de type Gutenberg-Richter

$$\lambda(M) = e^{\alpha - \beta M} = 10^{a - bM}$$

Où b est généralement proche de 1

Cette forme générique peut être tronquée à la magnitude maximale M_{\max} , mais elle peut aussi être modifiée vers les fortes magnitudes de telle sorte que $\lambda(M)$ tende vers 0 à l'approche de M_{\max} (asymptote verticale), par exemple sous la forme :

$$\lambda(M) = \lambda(M_0) \cdot \frac{e^{-\beta(M-M_0)} - e^{-\beta(M_{\max}-M_0)}}{1 - e^{-\beta(M_{\max}-M_0)}} = \lambda(M_0) \cdot \frac{10^{-b(M-M_0)} - 10^{-b(M_{\max}-M_0)}}{1 - 10^{-b(M_{\max}-M_0)}}$$

Une fois choisie la forme fonctionnelle de cette distribution, et fixées les valeurs de M_0 et M_{\max} (ou une distribution de valeurs de M_{\max}), les paramètres a (ou α ou $\lambda(M_0)$) et b (ou B) sont ajustés aux données du catalogue par des méthodes statistiques. Celle le plus souvent utilisée est celle du maximum de vraisemblance proposée initialement par Weichert (1980).

Tableau V : Pente des lois de récurrence Gutenberg-Richter obtenues pour les zones contrôlant l'aléa dans les rapports BRGM et les études d'aléa récentes sur la région Sud-Ouest Pacifique

Etude	Méthode	Valeurs a - b						
		zone locale			Subduction proche peu profonde		Subduction intermédiaire à profonde	
		$\lambda(5)$	$\lambda(5)/S$	b	$\lambda(5)$	b	$\lambda(5)$	b
BRGM2008	Weichert	0.160 ± 0.02	5.42 10 ⁻⁷	1.351±0.139	1.470 ± 0.13	0.595 ± 0.052	4.260 ± 0.2	0.682 ± 0.030
BRGM2015	Weichert	0.391 ± 0.054	3.05 10 ⁻⁶	1.472 ± 0.185	3.321 ± 0.197	0.860 ± 0.043	6.477 ± 0.267	0.951 ± 0.030
		0.414 ± 0.053	2.24 10 ⁻⁶	1.55 ± 0.179			11.54 ± 0.361	0.912 ± 0.023
BRGM2021	Weichert	0.328 ± 0.044	3.08 10 ⁻⁶	1.454 ± 0.182	3.124 ± 0.175	0.827 ± 0.040	5.443 ± 0.225	0.899 ± 0.031
		0.353 ± 0.047	2.21 10 ⁻⁶	1.396 ± 0.175			10.16 ± 0.312	0.862 ± 0.022
SG2009	Weichert (1980)			1.58		0.71		0.65
USGS2012	Weichert (1980)			1.01± 0.07		1.11 ± 0.10		1.00
REA2012	Non indiqué							
SRC2014	Non précisé	0.346	1.64 10 ⁻⁶	0.99		1.15		1.00
JPS2021	Faîles : sismicité et taux de déformation + couplage	-		-				
	Aires : Weichert			0.897		0.985		1.062

Le Tableau V liste les valeurs des pentes de ces lois de distribution (b) obtenues dans les différentes études d'aléa considérées ici, pour les principales qui contrôlent l'aléa dans le sud de Grande Terre (à savoir la zone de sismicité superficielle qui contient le site, ainsi que les zones de subduction des Vanuatu les plus proches, à sismicité peu profonde ou plus profonde). Le Tableau V indique également, pour les rapports BRGM, la valeur $\lambda(5)$ de ces mêmes zones. Il est difficile de comparer avec les autres études puisque les zonages sismotectoniques ne sont pas exactement les mêmes ; les études BRGM donnent pourtant aussi la densité surfacique $\lambda(5)/\text{surface}$ qui pourrait permettre de comparer avec les autres études, mais les autres publications ne donnent pas systématiquement cette valeur : les valeurs indiquées dans le tableau sont celles indiquées dans le rapport BRGM2015 (Tableau 26 p. 73)

Il ressort de cette comparaison que les études BRGM indiquent une valeur de b anormalement forte (de 1.35 à 1.55) pour la zone qui inclut l'ouvrage, et que cette valeur forte ne se retrouve que dans une seule des autres études d'aléa (SG2009), alors que trois autres (USGS2012, SRC2014 et JPS2021) donnent des valeurs de b autour de 1. Comme l'aléa à grande période de retour est contrôlé par la sismicité de cette zone, et que les taux de récurrence y sont très liés au paramètre b (plus b est fort, plus le taux de récurrence des fortes magnitudes est faible), il importe de mieux cerner l'origine de ces différences (qui contribue certainement fortement aux très fortes différences à longue période de retour entre SRC2014 et BRGM 2015/BRGM2021).

Une des origines peut être la faible sismicité de la zone correspondante, et la non-considération des événements de magnitude < 4 compte tenu de l'incomplétude du catalogue. L'existence depuis plusieurs décennies de quelques stations sismologiques permanentes à Grande Terre, ainsi que certaines expériences temporaires avec des réseaux plus denses, pourrait permettre de mieux contraindre le paramètre b , surtout si l'on individualise une zone d'extension plus réduite : non seulement le catalogue pourrait être considéré comme complet jusqu'à des magnitudes sensiblement plus basses, mais aussi cela permettrait de mieux prendre en compte la connaissance tectonique plus fine de cette zone autour de l'ouvrage (Dubois, 1974 ; Lagabrielle et al., 2005 ; Pillet & Pelletier, 2004, entre autres....). Cette option a été considérée dans l'étude récente de Chin et al. (2022), encore confidentielle mais soumise à publication; une première version conduisait de fait à des niveaux sensiblement plus importants à longue période de retour, mais qui s'avèrent révisés à la baisse dans la nouvelle version révisée.

Pour les zones de subduction, on observe de bien moins grandes différences d'une étude à l'autre, avec des valeurs de b plus proches de 1 (sauf dans l'étude initiale du BRGM2008, où les valeurs de b sont anormalement faibles, sans doute en lien avec la faible durée du catalogue considéré : aucun séisme avant 1964).

Remarque additionnelle sur les études BRGM : la lecture attentive des rapports BRGM indique une certaine ambiguïté entre les valeurs des taux $\lambda(4)$ et $\lambda(5)$ mentionnés dans les annexes et celles que l'on peut lire sur les graphiques ; après discussion avec le BRGM, elle apparaît liée à des questions de représentation des valeurs moyennes par intervalles $[m, m+\delta m]$, mais il serait à mon avis nécessaire, à des fins de traçabilité et de comparaison avec d'autres études, de préciser si les valeurs $\lambda(4)$ et $\lambda(5)$ données dans les tableaux correspondent à $\lambda(m)$ ou $\lambda(m+\delta m/2)$, c'est-à-dire, respectivement, $\lambda(4)$ ou $\lambda(4.25)$, et $\lambda(5)$ ou $\lambda(5.25)$.

3.1.4 Traitement des incertitudes

Les études BRGM prennent en compte les incertitudes sur le modèle de source de deux façons :

- d'une part avec un arbre logique pour différentes hypothèses ou différentes valeurs : pour ce qui concerne le modèle de source, il existe un seul branchement, celui correspondant au zonage.
- D'autre part avec des tirages aléatoires correspondant à des valeurs de certains paramètres : ici ces tirages portent sur la profondeur des événements (h), ainsi que sur les paramètres a et b (ou $\lambda(5)$ et B) de la loi de récurrence dans chaque zone-source.
- Pour les profondeurs, une distribution uniforme est considérée avec un intervalle de ± 15 km autour d'une profondeur moyenne pour les zones correspondant à l'interface de subduction, et de ± 10 km pour les autres zones
- Pour les paramètres de récurrence, c'est une distribution gaussienne qui est considérée, avec des écarts-types issus de l'évaluation par la méthode de Weichert. Il n'est pas précisé si les variabilités sur $\lambda(5)$ et B sont considérées comme indépendantes ou non. En principe, elles ne sont pas indépendantes, et il est généralement recommandé de représenter la corrélation entre $\lambda(5)$ et B . Les considérer comme indépendantes conduit à une majoration des incertitudes finales - si et seulement si les écart-types initiaux sont bien évalués, ce qui peut être questionné compte tenu des fortes variations d'une étude à l'autre, et du faible nombre d'événements pour certaines zones.

Si ce traitement des incertitudes est assez classique, il peut lui être reproché de ne pas prendre explicitement en compte les incertitudes sur les localisations et surtout les estimations de magnitude dans le catalogue initial (en tout cas cela n'est pas mentionné dans les documents disponibles), ni celles sur les périodes de complétude, ni celles sur M_{\max} et la forme fonctionnelle de la distribution retenue pour la troncature à M_{\max} . Les deux premières impactent directement l'incertitude sur les paramètres de récurrence $\lambda(5)$ et B , la dernière impacte directement l'aléa, et pourrait être prise en compte simplement via un branchement spécifique dans l'arbre logique (correspondant à plusieurs valeurs de M_{\max} et/ou plusieurs formes fonctionnelles).

3.2 Modèle de mouvements du sol

3.2.1 Type de mouvements (H - V)

Les mouvements sismiques réels ont 3 composantes en translation, deux horizontales H1 et H2, et une verticale V. Il est généralement considéré que les deux composantes horizontales ont les mêmes caractéristiques spectrales. Mais celles de la composante verticale ne sont pas nécessairement toujours déductibles simplement des composantes horizontales : si l'on admet assez souvent, par commodité un rapport de 2/3 entre le spectre V et le spectre H ($H_1=H_2$), cela constitue néanmoins une assez forte simplification, car ce rapport dépend au minimum a) de la fréquence, b) du type de source dominant (chevauchement, faille normale ou coulissage horizontal), et c) des conditions de site.

Toutes les études analysées ici, celles du BRGM et les autres sur la région, ne présentent de résultats que pour la composante horizontale.

Cela peut faire défaut s'il s'avérait utile ou nécessaire de faire une analyse dynamique (non-linéaire) de la stabilité de l'ouvrage sous sollicitation sismique multi-composantes, la composante verticale pouvant contribuer à modifier les efforts normaux sur le plan de glissement potentiel, et donc la capacité de résistance. *Une première option rapide serait alors de considérer le rapport "par défaut" de 2/3, et de générer les accélérogrammes synthétiques à 2 composantes correspondants. Une deuxième option, plus coûteuse en temps et en calculs, consiste à doubler l'étude PSHA d'une estimation des mouvements verticaux (GMPE pour mouvements verticaux, ou bien utilisation de GMPE "V/H").*

3.2.2 Sélection des GMPE (mouvements horizontaux)

3.2.2.1 Compilation et synthèse

Pour estimer les mouvements au site, on utilise des "GMPE" (Ground Motion Prediction Equations, ou Equations de Prédiction des Mouvements du Sol, EPMS, en français). Plusieurs centaines de telles équations ont été proposées au cours des dernières décennies, avec différentes formes fonctionnelles plus ou moins complexes, ajustées sur de nombreux jeux de données différents avec différentes techniques de régression. Le site <http://www.gmpe.org.uk> maintenu par John Douglas, qui compile l'essentiel des GMPE publiées de 1964 à 2021, donne une idée de cette multitude et de la diversité de telles GMPE (480 pour le PGA, 314 pour les spectres de réponse à différentes périodes...).

La sélection des GMPE à utiliser pour une étude spécifique n'est donc pas une chose aisée, surtout quand le manque d'enregistrements de mouvements forts empêche l'établissement de GMPE spécifiques pour la région considérée (ce qui est le cas pour la région Vanuatu / Sud-Ouest Pacifique). Des outils ont été proposés pour d'une part donner des critères de qualité sur les GMPE disponibles, et d'autre part identifier celles qui sont les mieux adaptées à un contexte tectonique ou un territoire donné. Ces derniers font souvent appel à la comparaison aux données existantes sur le territoire concerné : dans le cas présent de la Nouvelle Calédonie, il n'existe que relativement peu d'enregistrements disponibles (en nombre croissant cependant), mais si l'on élargit à la région plus vaste du Pacifique Sud-Ouest, cela devient possible, et a d'ailleurs été pris en compte dans certaines des études mentionnées : c'est ainsi que l'étude USGS 2012 pour les Samoa et voisinage a en partie basé son choix sur une comparaison prédictions / observations pour l'ensemble du Pacifique Ouest.

Le Tableau VI liste les GMPE considérées dans les différentes études considérées ici, en distinguant deux familles de GMPE : celles correspondant à la sismicité crustale superficielle (y compris en domaine océanique), et celles pour les séismes de subduction à plus ou moins grande profondeur, que ces séismes soient situés à l'interface entre les deux plaques ("interface"), ou bien à l'intérieur de la plaque plongeante ("intra-slab").

Tableau VI : Liste des GMPE considérées dans les différentes études analysées (classées en fonction de leur domaine d'application et de leur année de publication). Les cellules sont en blanc lorsque chacune des GMPE a été considérée dans une branche de l'arbre logique ; les cellules sont en grisé lorsque la GMPE finalement utilisée est la moyenne pondérée de celles considérées.

GMPE		Etudes							
		BRGM			Autres (Sud-Ouest Pacifique)				
		2008	2015	2021	SRC2014	SG2009	USGS2012	REA2012	JPS2021
Crustale superficielle	Sea97 (Sadigh et al., 1997)	1							
	Tea00 (Takahasi et al., 2000)					0.4			
	Lea01 (Lussou et al., 2001)					0.4			
	BA08 (Boore & Atkinson 2008)		0.333	0.333	0.25		0.167	0.25	0.3
	CY08 (Chiou & Youngs 2008)		0.333	0.333	0.25		0.167	0.25	0.3
	CB08 (Campbell & Bozorgnia 2008)		0.333	0.333	0.25		0.167	0.25	
	AS08 (Abrahamson & Silva 2008)				0.25			0.25	
	Zea06 (Zhao et al., 2006)						0.5 (+ modulations $\pm 25\%$)		0.4
Subduction (interface et intraplaque)	C91 (Crouse, 1991)					0.5			
	Youngs et al., 1997	1				0.5		0.25	0.33
	AB03 (Atkinson & Boore 2003)		0.5	0.5	1			0.25	0.33
	Zea06 (Zhao et al. 2006)		0.5	0.5			1, avec facteurs correctifs et modulations $\pm 25\%$	0.5	
	Aea16 (Abrahamson et al., 2016)								0.34

3.2.2.2 Commentaires

Même s'il existe des différences d'une étude à l'autre, on y constate une assez bonne convergence de choix.

- Pour la sismicité crustale superficielle hors subduction, les relations "NGA2008" établies à partir d'un jeu de données à dominance ouest-américaine apparaissent les plus utilisées dans les études de la dernière décennie. On peut cependant s'étonner que les plus récentes études (JPS2021, BRGM2021) n'aient pas pris en compte la version plus récente de cette famille (NGA-2, 2014, Bozorgnia et al., 2014 ; Gregor et al., 2014), ou celle établie sur un principe similaire sur un jeu de données pan-européen (RESORCE, 2014 ; Akkar et al., 2014 ; Douglas et al., 2014) : cela aurait sans doute permis une meilleure représentativité compte tenu de l'absence de GMPE locales.
- Pour la sismicité de subduction (inter- ou intra-plaque), ce sont surtout les GMPE Yea97, AB08 et Zea06 qui sont utilisées. La dernière est cependant remplacée dans l'étude la plus récente (JPS2021) par la GMPE Aea16 qui devient de plus en plus la référence ; il est un peu étonnant que la mise à jour de l'étude BRGM de 2021 ne l'ait pas au minimum testée, compte tenu des critiques qui sont faites dans un certain nombre de ces études (notamment USGS2012 et JPS2021) sur la surestimation à forte magnitude par AB03 et Zea06, pour lesquels certains facteurs correctifs sont parfois recommandés.

3.2.3 Prise en compte des incertitudes épistémiques

Ce type d'incertitude, qui correspond à l'absence de moyens quantitatifs permettant d'ajuster les GMPE aux données locales, peut être pris en compte de différentes façons

- Un arbre logique avec une branche pour chaque GMPE considérée comme acceptable, et un poids qui sera d'autant plus près d'une valeur uniforme pour toutes les branches qu'il existe moins d'éléments objectifs pour en préférer certaines au détriment des autres. Cette approche "classique" a été utilisée dans les études BRGM 2015 et 2021, SG2009 et JPS2021, ainsi que USGS2012 dans une certaine mesure.
- Une GMPE "moyenne" obtenue à partir d'un moyennage éventuellement pondéré des GMPE présélectionnées, ou bien dérivée spécialement pour la région (approche "backbone" comme proposée dans Douglas, 2018a, 2018b, et mise en œuvre pour l'Europe par Kotha et al. 2020 et Weatherill et al., 2020), autour de laquelle s'organise un ou plusieurs branchements d'arbre logique correspondant à différentes valeurs de certaines caractéristiques. L'approche "backbone" est encore trop récente pour pouvoir être appliquée sur la région du Sud-Ouest Pacifique, mais plusieurs études (SRC2014, USGS2012, REA2012, ont appliqué l'approche "moyenne", avec ou sans branchement supplémentaire : SRC2014 et REA2012 utilisent seulement les moyenne des GMPE considérées, tandis que USGS2012 introduit des branchements où la GMPE moyenne est augmentée ou diminuée de 25%, avec une pondération de 20% chacune, tandis que la GMPE moyenne se voit attribuer un poids de 60% (l'arbre logique USGS2012 est de fait un mix des deux approches).

L'approche "arbre logique" utilisée dans les études BRGM 2015 et 2021 est donc tout-à-fait conforme à l'état-de-la-pratique actuelle, à partir du moment où les GMPE de chaque branche sont justifiées. Il aurait cependant été possible / nécessaire que la mise à jour de 2021 intègre des mises à jour des GMPE sélectionnées en 2015 (NGA-2) voire de nouvelles (RESORCE, Aea2016)

3.2.4 Prise en compte des incertitudes aléatoires

3.2.4.1 Contexte : état de la pratique

La variabilité aléatoire correspond à l'écart-type des différentes GMPE, c'est-à-dire l'écart-type σ des différences entre prédictions et observations sur le jeu de données spécifique sur lequel chacune d'elles a été établie. Jusqu'à il y a environ une décennie, la pratique dans les études PSHA était de considérer que les prédictions "moyennes" de chaque GMPE étaient entachées d'une erreur à distribution lognormale, et que donc chaque prédiction devait être modifiée d'un facteur $\varepsilon \cdot \sigma$, où les valeurs de ε ayant une distribution gaussienne, et la discussion portait surtout sur la valeur maximale à considérer pour ε : 1, 2, 3, pas de limites, ce qui revenait à tronquer plus ou moins la distribution lognormale des prédictions.

Depuis une quinzaine d'années, la prise en compte de la variabilité aléatoire a connu de très importants développements, partant du constat qu'elle pouvait être décomposée en plusieurs composantes : une variabilité "inter-événements" ("between-event"), liée à la source (spécificités de la rupture sur la faille), et une variabilité "intra-événement" ("within-event"), associée d'une part à la diversité des sites d'enregistrement et d'autre part à la variabilité intrinsèque de la réponse d'un site donné, suivant le champ d'onde incident (azimut, incidence, composition). En d'autres termes, le résidu observation - prédiction Δ_{es} pour un événement e et un site s peut se décomposer en un résidu caractéristique de l'événement δB_e et un autre, appelé δW_{es} , avec $\Delta_{es} = \delta B_e + \delta W_{es}$. Ces deux termes inter et intra événement présentent tous deux une distribution lognormale, caractérisée par leurs écarts-type respectifs appelés τ et ϕ . Comme ces deux variabilités sont indépendantes, elles sont liées à σ par la relation $\sigma^2 = \tau^2 + \phi^2$, et l'expérience montre que ϕ est sensiblement supérieur à τ .

De plus, la variabilité intra-événement ϕ peut elle-même être décomposée en deux termes :

$$\delta W_{es} = \delta S_2 S_s + \delta W_{es}^0$$

Où $\delta S_2 S_s$ est le terme moyen du site s , et δW_{es}^0 est la variabilité résiduelle (associée au champ d'onde, à l'incidence, à l'azimut, ...). Ces deux termes ont eux-mêmes une distribution gaussienne caractérisée par leurs écarts-type dénotés respectivement ϕ_{s2s} et ϕ_{ss} . Comme ils sont eux aussi indépendants, on peut aussi écrire :

$$\phi^2 = \phi_{s2s}^2 + \phi_{ss}^2$$

Et donc

$$\sigma^2 = \tau^2 + \phi^2 = \tau^2 + \phi_{s2s}^2 + \phi_{ss}^2$$

Lorsque l'on considère un seul site, et que pour ce site on peut considérer connaître le terme spécifique de site δS^2_{SS} et l'incertitude épistémique associée, il est dès lors possible de diminuer la variabilité aléatoire totale σ pour la ramener à la variabilité "site-unique" ("single-site"), dénotée σ_{SS} et égale à

$$\sigma_{SS}^2 = \tau^2 + \phi_{SS}^2$$

Une telle diminution des incertitudes aléatoires peut sensiblement impacter (à la baisse) l'estimation de l'aléa à longue période de retour, et donc peut s'avérer intéressante. Des détails sur les conditions d'applicabilité de cette modification, ainsi que sur des valeurs typiques de ϕ_{SS}^2 peuvent être trouvés dans Rodriguez-Marek et al. (2011, 2013, 2014).

3.2.4.2 Cas des études BRGM

Cet aspect n'est pas évoqué dans les rapports BRGM, où l'aléa est estimé avec l'écart-type total σ sans troncature. Il serait intéressant de refaire les calculs d'aléa en utilisant un "single-site sigma" pour apprécier l'impact sur l'aléa à longue période de retour. En gardant à l'esprit qu'il faudra alors faire une étude spécifique du terme de site et des incertitudes associées pour le site KO2, c'est à dire la prise en compte de toutes les hypothèses plausibles pour les caractéristiques géotechniques des différentes formations.

3.3 Logiciel de calcul

Le logiciel utilisé (CRISIS) est un logiciel assez classique. Néanmoins, comme les auteurs indiquent un changement de version entre 2015 et 2021, il serait utile d'évaluer l'éventuelle incertitude "numérique" associée à la version du logiciel, en recalculant l'aléa dans les mêmes conditions que l'étude de 2015, mais avec la nouvelle version. Cette demande a déjà été formulée par Prony Resources au BRGM. Au cas où les différences seraient significatives (c'est-à-dire supérieures à 2-3 %), il faudrait identifier l'origine de ces différences pour s'assurer qu'elles ne peuvent pas être plus importantes dans certains cas de figure.

On peut cependant noter que le logiciel CRISIS a participé avec succès à un exercice de benchmarking de différents codes PSHA (Hale & Abrahamson, 2018), et que la probabilité est donc très faible qu'il y ait des biais significatifs associés à l'utilisation de ce logiciel particulier.

4 Conditions de site et effets de site

Il s'agit là d'un point qui n'est explicitement abordé nulle part dans les études BRGM, qui estiment l'aléa pour un "rocher standard" correspondant à un site assez raide ayant une valeur V_{S30} (moyenne harmonique de la vitesse d'ondes S sur les 30 premiers mètres) entre 760 et 1000 m/s.

La discussion qui suit est basée sur les informations disponibles au moment de la réalisation de cette expertise, à savoir le : rapport MECATER MC-21-301–PRNC–01-R103 présentant une synthèse sur la géologie du site, ainsi que sur les caractéristiques géotechniques et géophysiques. L'acquisition et/ou l'utilisation de ces informations sont détaillées dans plusieurs autres documents géotechniques référencés comme suit : REF 0171783848 Rev0, REF 1781012-009-R-Rev1, REF MC-18-146-VNC-03-R06, REF H354600-1000-220-230-2001_A1, REF 41-27708-000-CI-RPT-000020-Rev A, REF MC-20-197-VAL-04-R02-F, et REF MC-21-301-PRNC-01-R104.

Avertissement important : le modèle géologique présenté dans le rapport MECATER précité a connu des développements ultérieurs, intégrant notamment un approfondissement du bedrock. Les éléments présentés ci-dessous sont donc à considérer comme sujets à modification en fonction des évolutions du modèle géologique de synthèse, ce qui souligne d'autant plus l'intérêt des études de sensibilité et des mesures complémentaires mentionnées en fin de chapitre et dans les conclusions générales.

4.1 Conditions de site sous l'ouvrage

4.1.1 Géologie

Le rapport précité indique un substratum de péridotite, à très faible profondeur sur les crêtes autour de l'ouvrage, mais situé à une profondeur non négligeable (jusqu'à 45 m) au centre de la vallée, où il est surmonté par des dépôts de latérite et saprolite résultant de l'altération hydrique des péridotites, ainsi que par des colluvions et des sables alluviaux récents.

Comme l'indique la Figure 4 extraite du rapport MC-21-301–PRNC–01-R103, la géométrie de ces différentes formations semble être bien contrainte grâce à la compilation de nombreux forages ou autres investigations géotechniques et géophysiques.

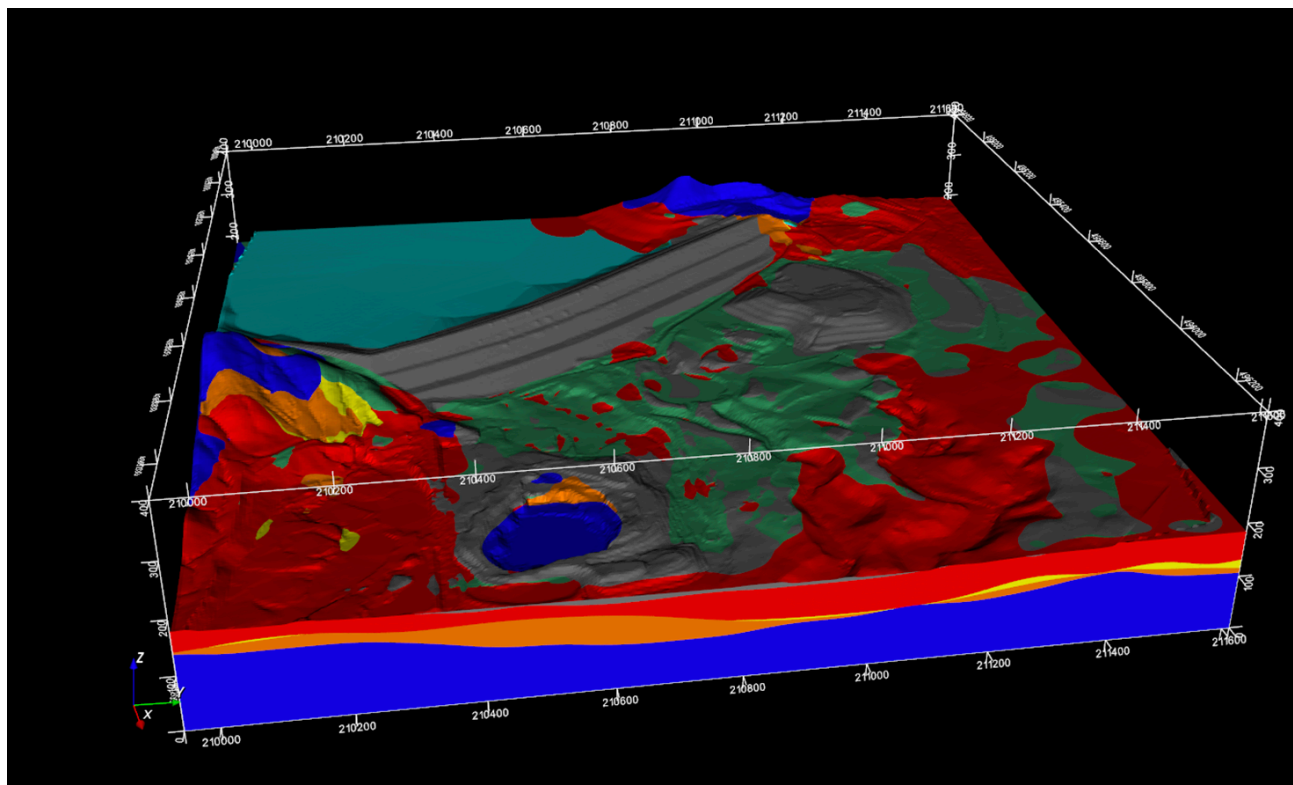


Figure 4 : Aperçu 3D de la structure géologique superficielle au site de l'ouvrage (extrait du rapport MC-21-301–PRNC–01-R103)

La carte du toit du substratum (péridotites peu ou pas altérées) représentée au bas de la Figure 5, ainsi que les diverses coupes transverses et longitudinale de la Figure 6, donnent plusieurs indications :

- une forte variabilité de l'épaisseur de la formation de saprolite rocheuse située juste au-dessus du bedrock

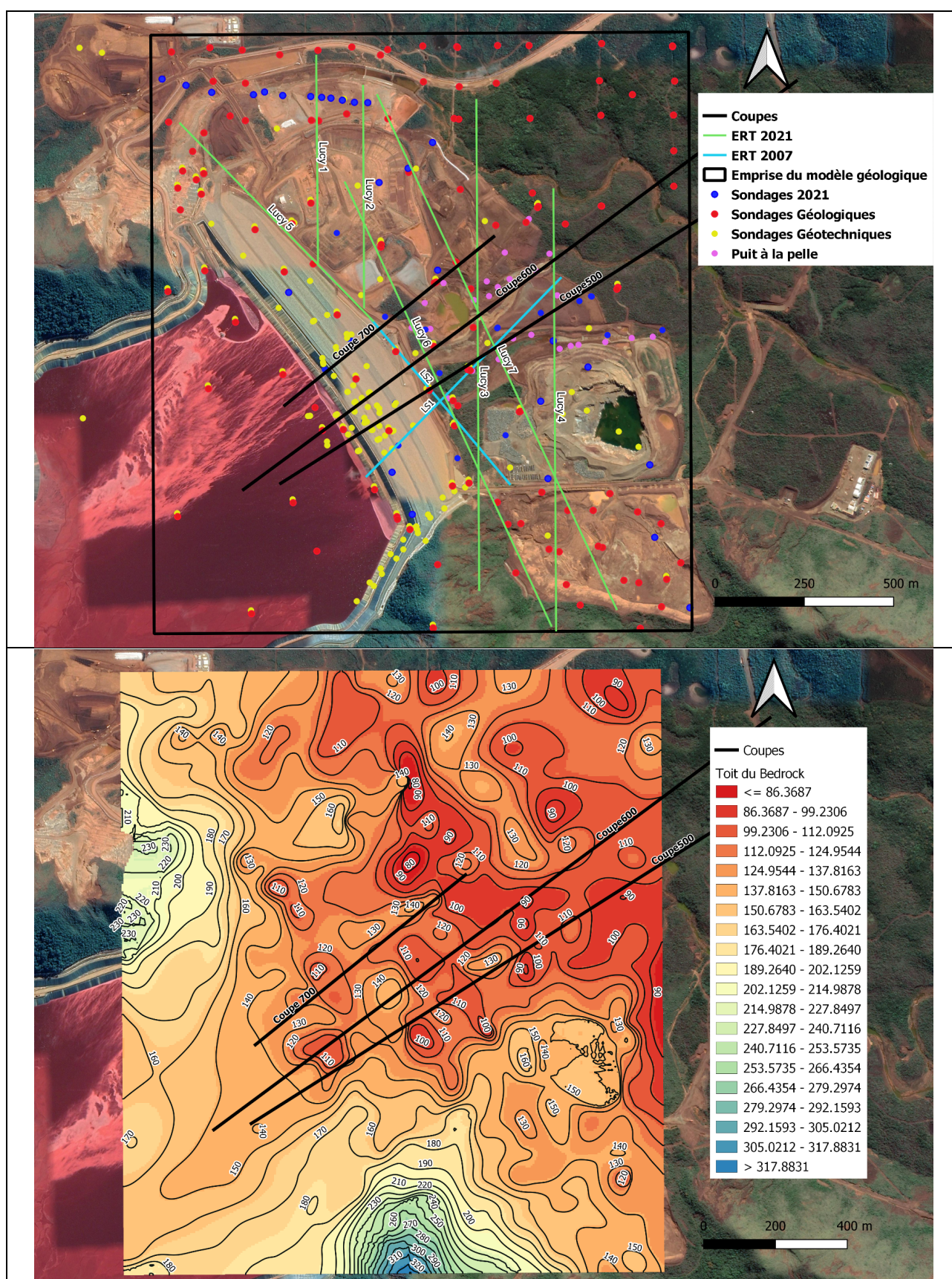


Figure 5 : Localisation de certaines coupes de référence par rapport à l'ouvrage (haut) et variations d'altitude du toit du bedrock (bas). Extrait du rapport MC-21-301-PRNC-01-R103

- la présence quasi systématique de la fine couche de saprolite terreuse (avec une épaisseur moyenne d'environ 3 m, mais variant apparemment de 1 à quelques mètres)
- une assez forte variabilité de l'épaisseur des couches de latérite rouge et de colluvions, avec des épaisseurs plus faible vers le Sud, et maximales dans la partie centrale de l'ouvrage.

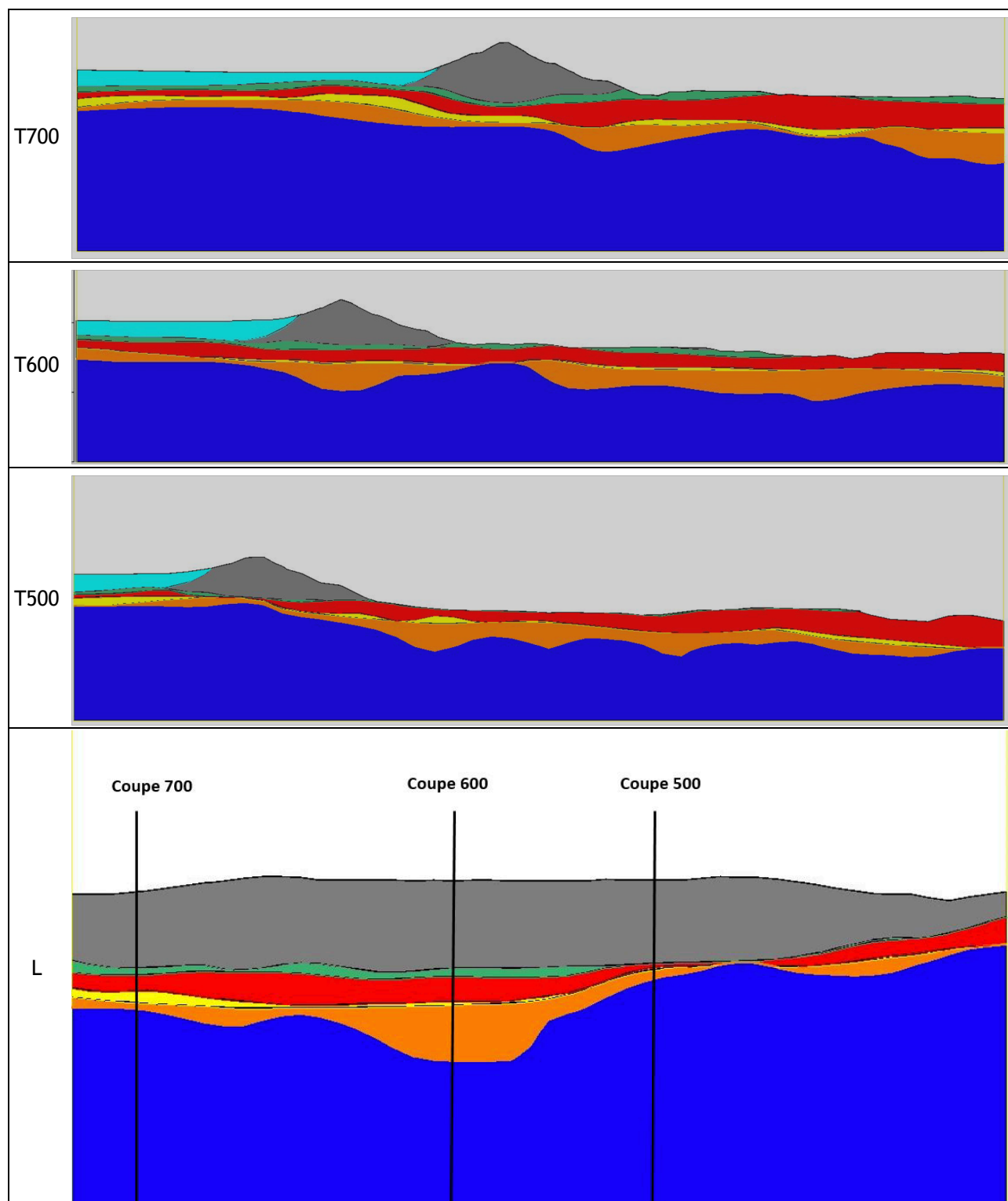


Figure 6 : Coupes géologiques transverses à l'ouvrage, du Nord (C700) vers le Sud (C500), et coupe longitudinale sous l'ouvrage (bas). La localisation des coupes transverses est indiquée sur la Figure 5. Extrait du rapport MC-21-301–PRNC–01-R103.

4.2 Effets potentiels associés

Cette structure superficielle, correspondant à des formations aux caractéristiques mécaniques plus faibles que le substratum, est susceptible de générer d'une part une modification significative des mouvements

sismiques à la base de l'ouvrage, et d'autre part une variabilité spatiale notable de ces mouvements le long de l'ouvrage, en raison des variations d'épaisseur des différentes formations. Les caractéristiques (niveau, fréquences) de ces effets dépendent fortement des propriétés sismiques et géotechniques des différentes formations, ainsi bien évidemment que de leur géométrie.

4.2.1 Paramètres géophysiques (sismiques) et géotechniques

Les effets d'amplification associés aux formations peu rigides dépendent au premier ordre de leur épaisseur et de leur rigidité (module de rigidité G ou vitesse d'ondes S Vs), et au deuxième ordre de leur amortissement, de leur densité et de leur coefficient de Poisson (ou rapport V_P/V_S). De plus, sous sollicitation assez forte, l'ampleur des effets non-linéaires (hors liquéfaction) est contrôlée par les courbes de dégradation (variations du module de rigidité et de l'amortissement avec le niveau de déformation en cisaillement), qui elles-mêmes dépendent de l'indice de plasticité, de la profondeur et du type de matériau. Les paramètres pris en compte dans les premières analyses dynamiques de la réponse du site sont résumés dans le Tableau VII, qui indique effectivement des vitesses Vs et des courbes de dégradation, obtenues soit à partir de mesures spécifiques, soit à partir de diverses références bibliographiques pour des matériaux similaires.

Tableau VII : Caractéristiques dynamiques prises en compte pour les premiers calculs dynamiques sur le projet Lucy - FEL3 (Certaines, notamment les vitesses Vs, ont cependant été modifiées pour les dernières études en cours)

Zone	Type du matériau	Vs	$G_{max} = \rho \cdot V_s^2$	Ru vs N/NL	Cyclic number	Fonction de réduction G/ Gmax	Coefficient d'amortissement	Source
		m/s	MPa					
Berme	1A	250	123.1	-	-	Rapport KO4 (Mêmes courbes que celles des Colluvions et des Latérites)		REF 017 1783848 Rev 0, REF 41-27708-000-CI-RPT-000020 - Rev A
	2D	250	137.5					
	3A	250	136.2					
	3B	250	136.2					
	3C	250	136.2					
Résidus	Résidus humides	200	52.0	-	-	Fonction de $IP = 20\%$ et $\sigma_{confinement} = 75kpa$ Ishibashi and Zhang (1993)		REF 017 1783848 Rev 0
	Résidus non compactés	200	52.0	Déduites à partir des essais cycliques 2019-Inpit Codisposal				REF MC-18-146-VNC-03-R06, REF H354600- 1000-220-230-2001_A1
Fondation de la berme	Colluvions	250	70.0	Courbe théorique -Dash and Sitharam (2009)	Rapport KO4			REF 1781012-009-R-Rev1, REF MC-18-146-VNC-03-R06, REF 41-27708-000-CI-RPT-000020 - Rev A
	Saprolite terreuse	250	70.0	Courbe théorique -Lee and Albasia (1974)				
	Latérite	250	70.0	Lee and Albasia (1974)	Déduite à partir des essais cycliques 2019-Inpit Codisposal	Rapport KO4		REF 1781012-009-R-Rev1, REF MC-18-146-VNC-03-R06, REF 41-27708-000-CI-RPT-000020 - Rev A
	Saprolite rocheuse	300	186.3	-	-			REF 017 1783848 Rev 0, REF 41-27708-000-CI-RPT-000020 - Rev A

Comme indiqué dans les références, les valeurs de vitesse d'onde S pour les matériaux "naturels" en place (colluvions, latérite, saprolites terreuse et rocheuse, et péridotites plus ou moins altérées, proviennent essentiellement de mesures en "cross-hole" (pour l'ouvrage KO4), en "down-hole" (quelquefois avec l'outil spécifique "SDMT" "dilatomètre sismique" SDMT), parfois complétées par quelques mesures en laboratoire au "bender element". Ces mesures sont synthétisées dans la Figure 7, extraite de la référence REF 41-27708-000-CI-RPT-000020 - Rev A. On y voit que les vitesses les plus faibles correspondent aux sols latéritiques en place, à la "zone de transition" et à la saprolite terreuse. Une analyse des mesures cross-hole montre des vitesses VS pouvant descendre en-dessous de 200 m/s (jusqu'à 160 m/s mesuré) à la base des sols latéritiques (correspondant à la "zone de transition" ou à la "saprolite terreuse". De telles valeurs n'apparaissent que sur les mesures CH, et pas sur les mesures DH, ce qui est assez compréhensible compte tenu de la moins bonne résolution en profondeur de ces derniers. La vitesse de 250 m/s indiquée dans le Tableau VII est donc peut-

être un peu optimiste, et il serait prudent de renouveler les calculs de réponse de site avec des valeurs inférieures.

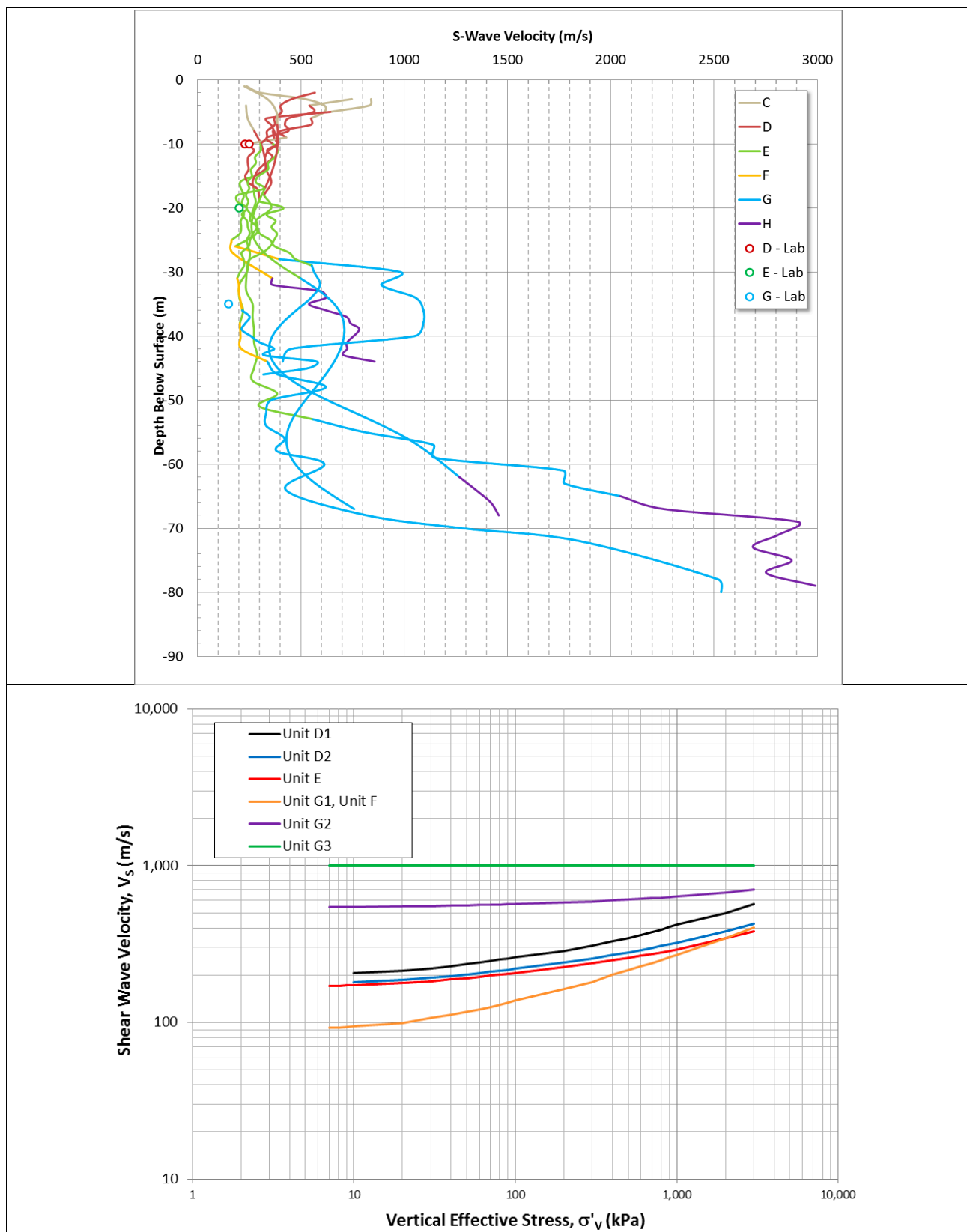


Figure 7 : Synthèse des mesures de V_s pour les différentes formations de l'ouvrage K02 (Figures C1 et C2 extraites de la référence REF 41-27708-000-CI-RPT-000020 - Rev A, p.48). En haut : Profils de vitesse $V_s(z)$ en fonction de la profondeur, avec un code couleur correspondant aux différentes formations. En bas : évolution de V_s avec la pression verticale effective. Codes formations : C = "croûte de surface" "ferricrete" ; D = latérites transportées et redéposées ; E = latérites jaunes et rouges, sols résiduels en place ; F = "zone de transition", G = saprolite, de G1 saprolite terreuse à G3 saprolite "très rocheuse" / toit des péridotites ; H = bedrock de péridotites saines.

On peut noter d'ailleurs qu'une étude MECATER antérieure (REF MC-20-197-VAL-04-R02-F) indiquait des valeurs de V_s plus faibles pour la latérite et la saprolite terreuse (150 m/s, Tableau 10 p.12) : la comparaison des résultats des calculs de réponse dynamique 2020 et 2021, voire 2022 avec les dernières modifications, apporterait des éléments intéressants sur leur sensibilité aux hypothèses considérées pour ces formations les plus molles.

4.2.2 Conséquences potentielles

4.2.2.1 Effets d'amplification linéaire 1D / 2D / (3D)

Si l'on se base sur ces valeurs, les formations en place de saprolite rocheuse, terreuse, de latérite et de colluvions ont des vitesses d'ondes S assez proche, de 250 à 300 m/s (un peu plus fort pour la saprolite rocheuse). D'après les coupes, leurs épaisseurs sont de quelques m à une dizaine de m pour les colluvions, de 10 à 20 m pour la latérite jaune/rouge, de quelques mètres pour la saprolite terreuse, et de 10 à 20 m pour la saprolite rocheuse, ce qui donne une épaisseur totale entre 25 et 55 m. Si l'on prend une vitesse moyenne de 250 m/s, les formations en place devraient conduire à des amplifications d'un niveau autour de 3- 4 avec une fréquence de résonance fondamentale pouvant descendre jusqu'à 1 à 1.5 Hz.

Compte tenu de la formation en vallée (avec une largeur NS autour de 1 km), et des fortes variations d'altitude du toit du substratum, on peut en outre s'attendre à des effets supplémentaires de piégeage latéral, conduisant à un surcroît d'amplification et un élargissement de la bande de fréquences amplifiée. Un ordre de grandeur approximatif de ces effets de suramplification peut être obtenu avec une approche en "facteur d'aggravation" estimant le surcroît d'amplification associés aux effets pluri-dimensionnels (voir par exemple Chavez-Garcia and Faccioli, 2000 ; Riga et al., 2016 ; Moczo et al., 2018 ; Boudghène-Stambouli et al., 2018). Suivant l'indicateur de mouvement du sol considéré (PGA, PGV, spectre de réponse à une période particulière, ...), ces facteurs d'aggravation peuvent varier entre quelques dizaines de % et des facteurs 2 ou 3. Il est probable qu'ils seraient relativement modérés dans le cas présent pour la composante horizontale des mouvements sismiques (assez faible encaissement, contraste mécanique limité si on ne prend pas en compte les péridotites saines en profondeur avec V_s autour de 3000 m/s) ; il sont cependant sensiblement plus importants pour la composante verticale (Moczo et al., 2018). De plus, de tels effets pluri-dimensionnels 2D ou 3D) ne sont quasiment jamais considérés dans la pratique actuelle.

La berme a quant à elle une hauteur H d'environ 60 m avec des matériaux constitutifs ayant une vitesse V_s autour de 250 m/s (cf. Tableau VII) : cela permet d'estimer sa période propre autour de 0.6 s (formule $T_0 = 2.61 \cdot H / V_s$), dont une fréquence autour de 1.6 Hz. Cette coïncidence entre la fréquence (estimée) et la fréquence (estimée) de l'assise indique que ces phénomènes d'amplification dynamique, qu'ils soient mono ou pluridimensionnels peuvent jouer un rôle non-négligeable et affecter la stabilité de l'ouvrage.

Il existerait un moyen simple et peu coûteux de vérifier ces estimations, et par la même occasion de calibrer la partie linéaire des calculs de réponse dynamique, en faisant des mesures de bruit de fond sismique avec des capteurs 3 composantes, d'une part sur le sol d'assise en fond de vallée, et d'autre part le long de la crête de l'ouvrage, et en les analysant avec la méthode H/V. Un autre moyen, à plus longue échéance, serait d'installer des stations sismologiques sur le site de l'ouvrage (sur un site de référence où les péridotites peu altérées affleurent, sur l'ouvrage, et sur son sol de fondation), et d'analyser les enregistrements obtenus. Les expériences récentes faites en France (notamment à Cadarache, Perron et al, 2017 ; 2018) montrent que l'on peut obtenir des résultats fiables et robustes au bout d'un à deux ans d'instrumentation.

4.2.2.2 Modulations par le comportement non-linéaire

Ces effets d'amplification peuvent être notablement modifiés (en général diminués) pour de fortes sollicitations sismiques, avec un décalage vers les basses fréquences (baisse du module de rigidité), et une diminution du niveau d'amplification (augmentation de l'amortissement).

Les études de stabilité déjà conduites ont effectivement inclus la réalisation de calculs de réponse 1D avec des codes fonctionnant en "linéaire équivalent", prenant en compte les profils de vitesse du Tableau VII, ainsi que des courbes de dégradation (réduction du module de rigidité, augmentation de l'amortissement) choisies en fonction de la nature des sols. Les exemples de résultats fournis dans l'annexe G de la référence REF 41-27708-000-CI-RPT-000020 - Rev A (p. 59 - 77, et plus particulièrement les figures G6 et G7), montrent clairement l'effet majeur des formations situées entre les altitudes 140 et 145 m, associées à la "zone de transition", qui ont un effet de filtre coupant les hautes fréquences (et donc le PGA). L'origine en est très probablement la localisation de fortes déformations dans cette zone, conduisant à de fortes valeurs

d'amortissement ; une comparaison avec des calculs purement linéaires serait cependant utile à la compréhension du mécanisme de ce "filtrage" des hautes fréquences.

On peut signaler par ailleurs que les calculs de type "linéaire équivalent" présentent plusieurs types de limitations :

- Cette approche linéaire équivalente n'est formellement acceptable que jusqu'à un seuil limité de déformations dynamiques (en dessous de 0.5 %, Kaklamanos et al., 2013)), et les déformations obtenues ne sont pas indiquées dans les rapports d'étude (REF 41-27708-000-CI-RPT-000020 - Rev A, appendix F, p. 59 - 77). Il serait utile de vérifier les niveaux de déformation atteints dans les calculs de réponse dynamique 1D
- Un certain nombre d'études récentes (Rodriguez-Marek et al., 2021) indiquent par ailleurs une tendance de cette approche à surestimer les effets bénéfiques de l'augmentation de l'amortissement dès que les niveaux de déformations dépassent 0.1 %, et recommandent l'utilisation d'une approche linéaire équivalente alternative intégrant une dépendance fréquentielle des courbes de dégradation.
- Les résultats en termes de profil d'accélération en différents endroits de la berme indiquent justement une assez nette coupure à partir du toit des saprolites. Il est probable que cet effet soit plus exacerbé encore si l'on prend des caractéristiques dynamiques plus faibles ($V_s \leq 200$ m/s, cf § 4.2.23 suivant)

4.2.2.3 Focus sur les effets potentiels de la fine couche de saprolite terreuse / "zone de transition"

La présence de la fine couche de saprolite terreuse mérite à mon avis une attention particulière. Si, comme indiqué dans le Tableau VII, elle a effectivement la même vitesse V_s que les formations au-dessus (latérite et colluvions), il n'y a pas de raison de l'individualiser dans un calcul dynamique linéaire. Néanmoins, sa description dans le rapport MECATER précité suggère que cette formation très compressible est mécaniquement plus faible et fragile que les latérites qui la surmontent, et certains des résultats de cross-hole du site KO4 indiquent d'ailleurs des valeurs de $V_s \leq 200$ m/s (jusqu'à 160 m/s) aux horizons correspondant à ces formations.

L'hypothèse que cette couche ait une vitesse plus faible qu'au minimum les colluvions et le matériau de la berme semble plausible. Cela pourrait alors avoir des conséquences sur les phénomènes d'amplification en surface, pour 2 raisons

- En régime linéaire (faible sollicitation), une couche fine à sensiblement plus faible vitesse que les formations inférieure et supérieure peut jouer un rôle analogue à un "isolateur sismique", comme indiqué dans Guéguen et al. (2011) pour un site en Guadeloupe (sable raide sur mangrove), Rahpeyma et al. (2016) pour un site volcanique en Islande (coulée basaltique surmontant des dépôts sédimentaires moins raides), ou en encore Leissi-Chemariou et al. (2019) pour un site de rocher sédimentaire quasiment horizontalement stratifié dans le Somerset présentant une formation moins raide à assez grande profondeur. Comme pour les appuis isolateurs, la concentration des déformations de cisaillement dans la formation plus souple, et un effet de "pendule inversé" entraînant d'une part un décalage de la fréquence de résonance vers le bas, et d'autre part, potentiellement (en fonction du profil réel de vitesse) un filtrage des plus hautes fréquences. Pour un système simple d'une couche meuble d'épaisseur h_2 , de vitesse V_{s2} , et de masse volumique ρ_2 insérée sous une couche plus épaisse (h_1) et raide (V_{s1}) et de masse volumique ρ_1 , la fréquence peut être estimée par la formule $f_0 = \frac{2}{\pi} \frac{V_{s2}}{4h_2} \sqrt{\frac{\rho_2 h_2}{\rho_1 h_1}}$, montrant l'importance de l'estimation de la vitesse dans la couche la plus souple, ainsi que son épaisseur.
- Sous plus forte sollicitation, la concentration des déformations dans la couche à faible rigidité peut être exacerbée par les processus non-linéaires, qui conditionnent la dégradation de la rigidité au niveau de déformation

De tels effets peuvent être "bénéfiques" par la réduction des mouvements à haute fréquence, mais sont aussi associés à une amplification basse fréquence affectant les déplacements de l'ensemble des formations surmontant la couche fine, donc ici de l'ensemble de la berme. Il me semblerait donc très utile de réaliser une étude de sensibilité des calculs de réponse dynamique 1D à des vitesses sensiblement plus faibles dans cette "zone de transition". De plus, compte tenu des distances assez fortes entre forages pour les mesures cross-hole à KO4 (de 10 à 25 m), il se peut que ces mesures n'aient pas la résolution nécessaire pour identifier de très faibles vitesses sur des couches très fines (épaisseur très inférieure à la distance entre forages). D'autres types de mesures en forage, de type "suspension logging", permettraient d'obtenir un profil de

vitesse $V_s(z)$ à haute résolution et de trancher sur l'existence ou non de tels effets très particuliers. Des mesures de type H/V bruit de fond pourraient aussi donner des indications, mais comme leur interprétation est plus délicate pour un environnement complexe, elles ne seraient intéressantes, - pour ce point particulier -, qu'en complément de mesures en forage.

5 Résultats

Pour ce qui concerne l'aléa dans le sud de Grande-Terre, les résultats de ces diverses études d'aléa sont assez complets pour les études "site-spécifique" du BRGM et SRC2014, un peu moins pour JPS2021, et quasiment inexploitable pour les autres études (SG2009, USGS2012 et Rea2012) qui se focalisent sur d'autres zones géographiques (Vanuatu, Samoa-Vanuatu, et autres îles du SO Pacifique). Ces résultats prennent plusieurs formes :

- courbes d'aléa pour le PGA et certaines valeurs spectrales $S_a(T_i)$,
- spectres d'aléa uniforme "UHS" (c'est-à-dire où chaque ordonnée spectrale a la même probabilité d'être dépassée sur une durée donnée), parfois en spectres conditionnés moyens ("CMS"),
- résultats de désagrégation pour identifier les scénarios dominants contrôlant l'aléa à une période spectrale donnée et une période de retour donnée,
- et enfin des accélérogrammes correspondants à ces scénarios et à ces spectres, pour permettre de faire des analyses dynamiques de la réponse temporelle non-linéaire de l'ouvrage.

5.1 Courbes d'aléa

Une courbe d'aléa représente, pour un paramètre du mouvement du sol, l'évolution de la probabilité annuelle p_a qu'un certain niveau a soit dépassé, en fonction de ce niveau. Ce sont des courbes décroissantes, que l'on peut généralement approximer par une loi puissance du type

$$p_a = p_{a_0} (a/a_0)^{-\gamma}$$

Où p_{a_0} est la probabilité annuelle de dépassement pour un niveau de référence a_0 . L'exposant γ a souvent été considéré comme étant de l'ordre de 3, mais les études les plus récentes indiquent souvent une valeur sensiblement inférieure, parfois inférieure à 2.

Les courbes d'aléa pour le PGA et les accélérations spectrales à 0.2 et 1 s sont représentées sur la Figure 8 en diagramme log-log, pour les différentes études donnant des résultats spécifiques pour des sites localisés dans le Sud de Grande-Terre : l'ouvrage K02 pour les études du BRGM, l'ouvrage VNC-K04-FELS3 pour SRC2014, et la capitale Nouméa pour JPS2021. Il en ressort plusieurs observations :

- La variabilité "épistémique" (c'est-à-dire selon les branches de l'arbre logique) au sein d'une même étude est indiquée par l'écart entre les fractiles F15 et F85 ; elle est assez significative et augmente de BRGM2015 à BRGM2021. Le rapport F85/F15 montre une tendance à l'augmentation avec la période spectrale et avec la période de retour, avec un intervalle compris entre 1.83 ($T=0.2s$, $PR = 200$ ans) et 4.25 ($T=2s$, $PR = 10000$ ans) pour BRGM2015, et entre 1.53 ($T=0.2s$, $PR = 200$ ans) et 6.06 ($T=4s$, $PR = 10000$ ans) pour BRGM2021. On peut noter cependant une certaine réduction de l'intervalle à courte période spectrale ($T < 0.4$ s) pour BRGM2021.
- En termes d'aléa moyen, les estimations BRGM2021 sont légèrement plus fortes que celles de BRGM2015 sur toute la gamme de périodes. L'estimation JPS2021 reste entre les deux à courte période et est inférieure aux deux à longue période : cela peut être dû au fait que le site y est différent (Nouméa) et plus à l'ouest donc un peu plus loin de la zone de subduction des Vanuatu qui contrôle l'aléa à longue période, ainsi qu'à l'utilisation d'une GMPE "subduction" plus récente (Eae16) et en principe mieux calibrée. L'estimation SRC2014 est nettement au-dessus de BRGM2021 à courte période, mais est inférieure même à BRGM2015 pour les périodes spectrales supérieures à 1 s.
- Hormis pour l'étude SRC2014, les valeurs de l'exposant de la loi puissance approximaient les lois d'aléa sont assez proches de la valeur habituelle de 3 à courte période pour les études BRGM, mais diminuent à plus longue période (jusqu'à autour de 2.5 pour BRGM2015 et presque 2 pour BRGM2021). Pour JPS2021, la valeur est disponible seulement pour le PGA et est autour de 2.5 entre 500 et 10000 ans. Pour SRC2014, la valeur de l'exposant décroît d'environ 2.75 à courte période à autour de 2.4 autour de 1 s.

Il importe à ce stade de mentionner aussi les résultats obtenus par Chin et al. (2022, en révision) à partir de leur jeu de données obtenu après une campagne d'enregistrement de 1 an sur un profil E-W dans le sud de Grande Terre. Ces résultats étaient relativement proches de ceux de l'étude SRC2014 au moins pour le PGA pour le site de Noumea (autour de 0.16 g pour une période de retour de 500 ans - OBE-, autour de 0.3 g pour 2500 ans, et autour de 0.5 g pour 10000 ans - SEE); cependant, la nouvelle version après révision revient à des niveaux comparables à ceux des études JPS2021 et BRGM. Elle ne donne cependant aucun résultat pour d'autres périodes spectrales.

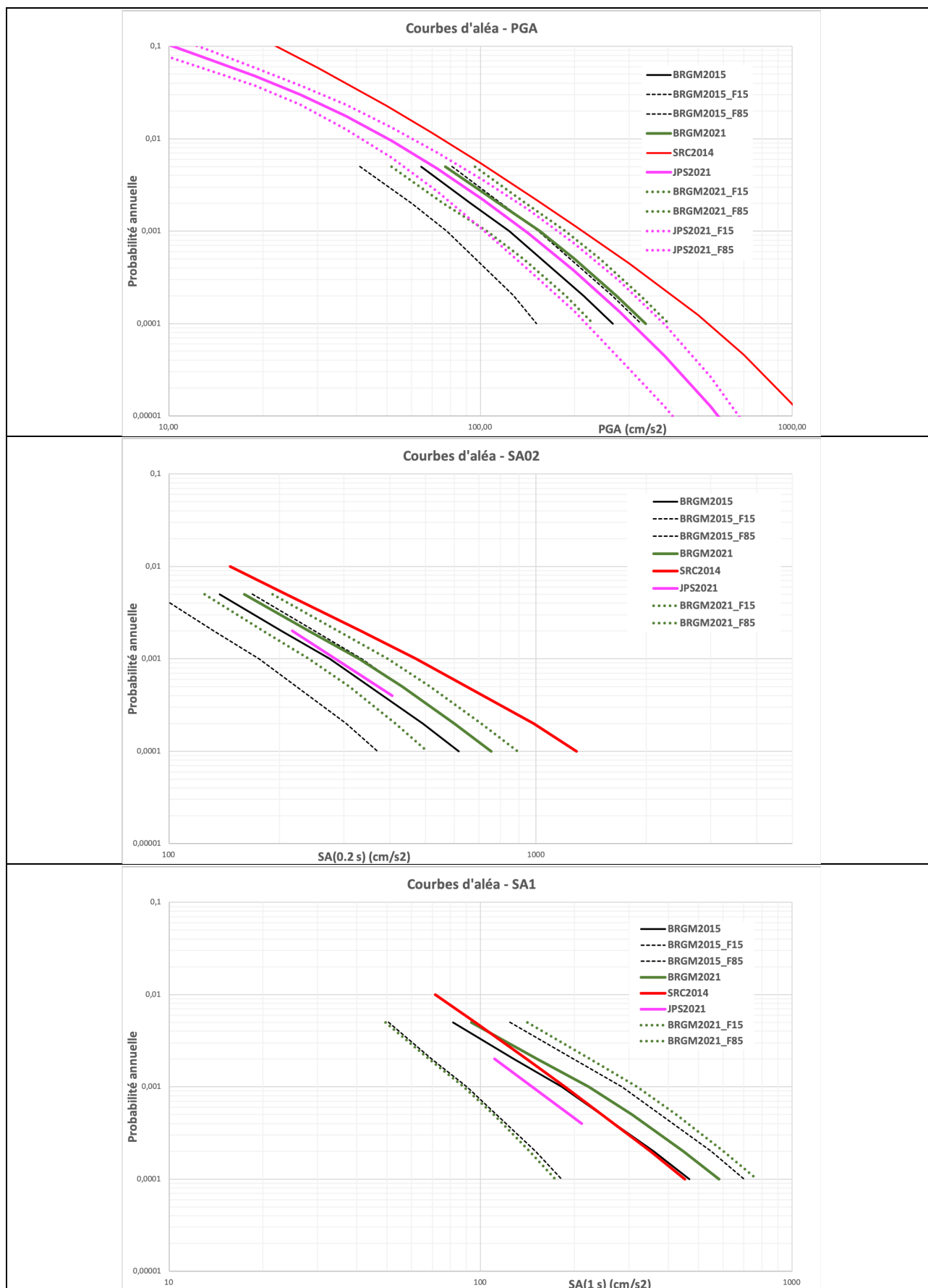


Figure 8 : Courbes d'aléa pour trois périodes spectrales (0, 0.2 et 1.0 s de haut en bas) proposées pour le Sud de Grande-Terre dans différentes études récentes : BRGM2015 en noir (moyenne en trait plein, fractiles 15% et 85% en tireté), BRGM2021 en vert (moyenne en trait plein, fractiles 15% et 85% en pointillé), SRC2014 en rouge (site VNC-KO4-FELS3) et JPS2021 en magenta (site de Nouméa, moyenne en trait plein, fractiles 15% et 85% en pointillé). Pour 0.2 s et 1.0 s, l'étude JPS2021 ne fournit les valeurs d'aléa que pour les deux périodes de retour 500 et 2500 ans (probabilités annuelles 0.002 et 0.0004, respectivement)

5.2 Spectres UHS

Les spectres UHS moyen à 500 et 10000 ans de période de retour obtenus dans chaque étude sont comparés dans la Figure 9, en intégrant également les fractiles 15% et 85% pour les études BRGM2015 et BRGM2021. La courbe en tireté magenta mentionnée à 10000 ans pour l'étude JPS2021 n'est cependant donnée qu'à titre indicatif car il s'agit d'une extrapolation du spectre UHS 2500 ans pour le site de Nouméa l'extrapolation a été faite avec un exposant de -3 pour la loi puissance des courbes d'aléa, à toutes les périodes spectrales. On y retrouve les observations déjà faites sur les courbes d'aléa, à savoir :

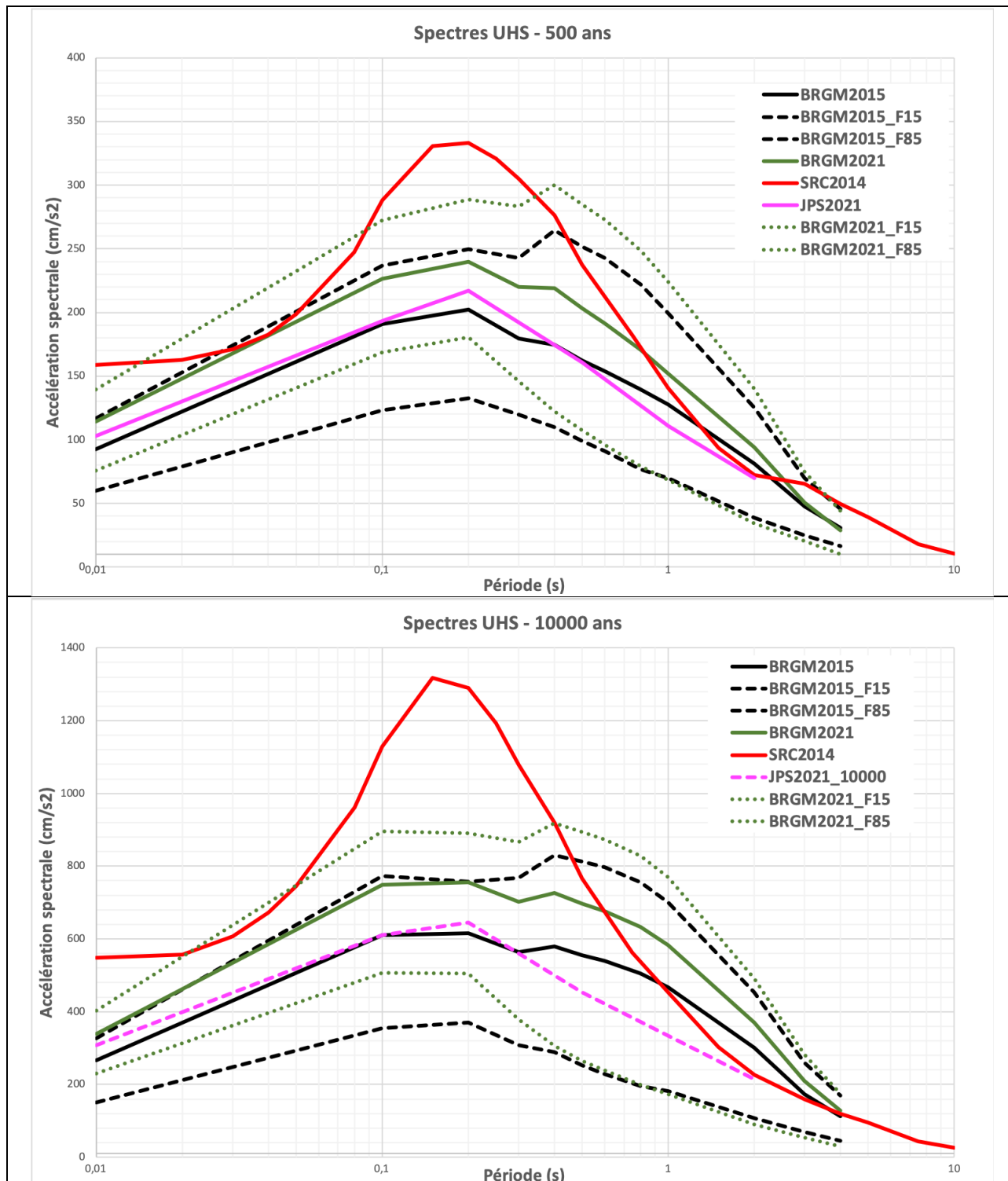


Figure 9 : Spectres UHS obtenus pour le sud de Grande-Terre à 500 ans (haut) et 10000 ans (bas) de période de retour dans différentes études récentes : BRGM2015 en noir (moyenne en trait plein, fractiles 15% et 85% en tireté), BRGM2021 en vert (moyenne en trait plein, fractiles 15% et 85% en pointillé), et SRC2014 en rouge (site VNC-KO4-FEL53). La courbe en tireté magenta correspond à une extrapolation du spectre UHS 2500 ans donné dans JPS2021 pour le site de Nouméa l'extrapolation a été faite avec un exposant de -3 pour la loi puissance des courbes d'aléa, à toutes les périodes spectrales.

- Légère augmentation de l'aléa estimé par les études BRGM entre 2015 et 2021, avec légère réduction de l'écart entre les fractiles F15 et F85 pour l'étude BRGM2021
- L'étude "site-spécifique" SRC2014 donne des estimations moyennes très supérieures à courte période ($T \leq 0.6-0.7$ s), mais inférieures à longue période, pour les 2 périodes de retour considérées. Il n'est pas immédiat de savoir si cela vient des GMPE utilisées et/ou des modèles de récurrence pour la zone locale (RB, New-Caledonia East)
- L'aléa à 500 ans estimé par l'étude JPS2021 pour Nouméa est intermédiaire entre les estimations BRGM2015 et BRGM2021, celui extrapolé à 10000 ans également à courte période, mais sensiblement inférieur à longue période : cela peut provenir des GMPE utilisées pour la subduction, plus récentes et intégrant un plus grand nombre d'enregistrements

Par ailleurs la Figure 10 indique des différences très importantes entre les spectres UHS médian (fractile F50) et moyen aux deux périodes de retour 500 et 10000 ans. Ces différences vont bien au-delà des rapports usuels moyenne / F50 qui sont de l'ordre de 10%. Elles sont également très variables en fonction de la période spectrale : elles sont conformes aux attentes, c'est-à-dire autour de 10%, à courte période ($T \leq 0.3$ s), et beaucoup plus importantes (jusqu'à plus de 100% pour BRGM2021) à période intermédiaire et longue. Ce résultat inhabituel est à rapprocher de la forme "à 2 maxima" des spectres UHS F85 et moyen, notamment à longue période de retour, et est selon toute vraisemblance à mettre en relation avec les résultats de désagrégation (cf. § 5.3), montrant des contributions à peu près équivalentes de la sismicité locale modérée (faible contenu longue période), et de la forte sismicité lointaine (très riche en longues périodes, beaucoup moins en courtes périodes).

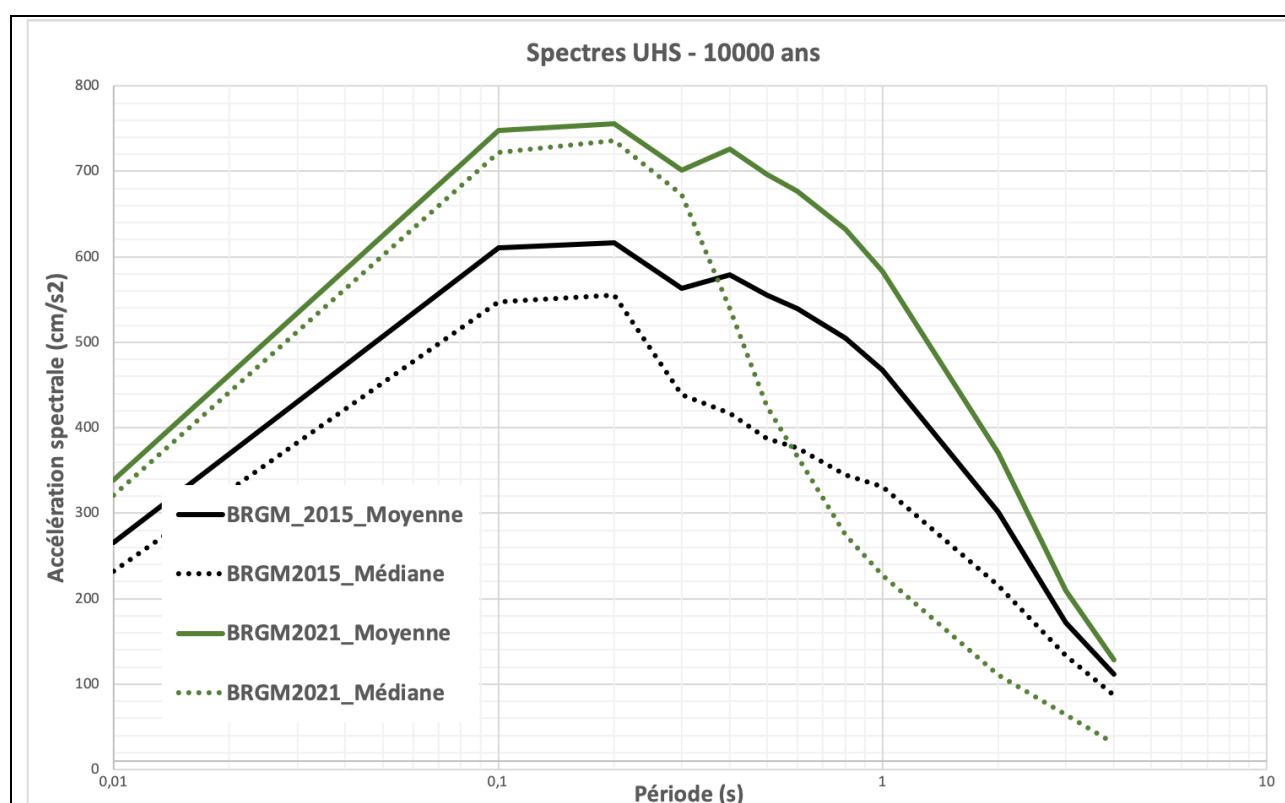


Figure 10 : Comparaison des spectres UHS moyen (trait plein) et médian (trait pointillé), obtenus pour une période de retour de 10000 ans dans les études BRGM2015 (noir) et BRGM2021 (vert)

5.3 Désagrégation

Le processus de désagrégation permet d'identifier quelles sont les zones ou quels sont les scénarios (magnitude-distance, voire magnitude-distance- ϵ) qui contribuent le plus à l'aléa, pour une période de retour donnée, et une période spectrale donnée. Les résultats sont assez similaires, au moins qualitativement, pour toutes les études intégrant ce genre d'analyse (c'est-à-dire BRGM2015 et 2021, qui fournissent des résultats détaillés pour différentes périodes de retour et différentes périodes spectrales, et

dans une moindre mesure SRC2014 et JPS2021 qui donnent des résultats uniquement pour la désagrégation du PGA).

5.3.1 Aléa Courte période / haute fréquence (PGA)

La Figure 11 représente la contribution à la courbe d'aléa en PGA de chacune des zones source considérées dans les études BRGM2015 et BRGM2021. La Figure 12 détaille la contribution des différents scénarios (magnitude-distance) à l'aléa en PGA à deux périodes de retour différentes, 500 et 10000 ans, à nouveau pour les 2 zonages considérés. Il en ressort que si, à des périodes de retour modérées (celles correspondant à l'OBE), les sources locales (R2 ou RB) ont des contributions relativement comparables (bien que généralement plus fortes) aux sources lointaines de subduction (Vanuatu), à longue période de retour (10000 ans, SEE), ce sont les sources proches qui apportent la principale contribution.

On retrouve qualitativement le même résultat (contributions relativement équilibrées des zones proches et subduction à période de retour modérée, prédominance de la zone proche à longue période de retour) dans l'étude SRC2014 (Figure 13), et, partiellement, dans l'étude JPS2021 (Figure 14, cette étude ne donne de résultats de désagrégation que pour une période de retour de 500 ans).

La conclusion principale en est que, à courte période spectrale, c'est la sismicité proche qui contrôle l'aléa. Il est donc primordial d'utiliser toutes les données et connaissances disponibles pour contraindre au mieux le modèle de récurrence correspondant, en prenant également en compte les incertitudes associées.

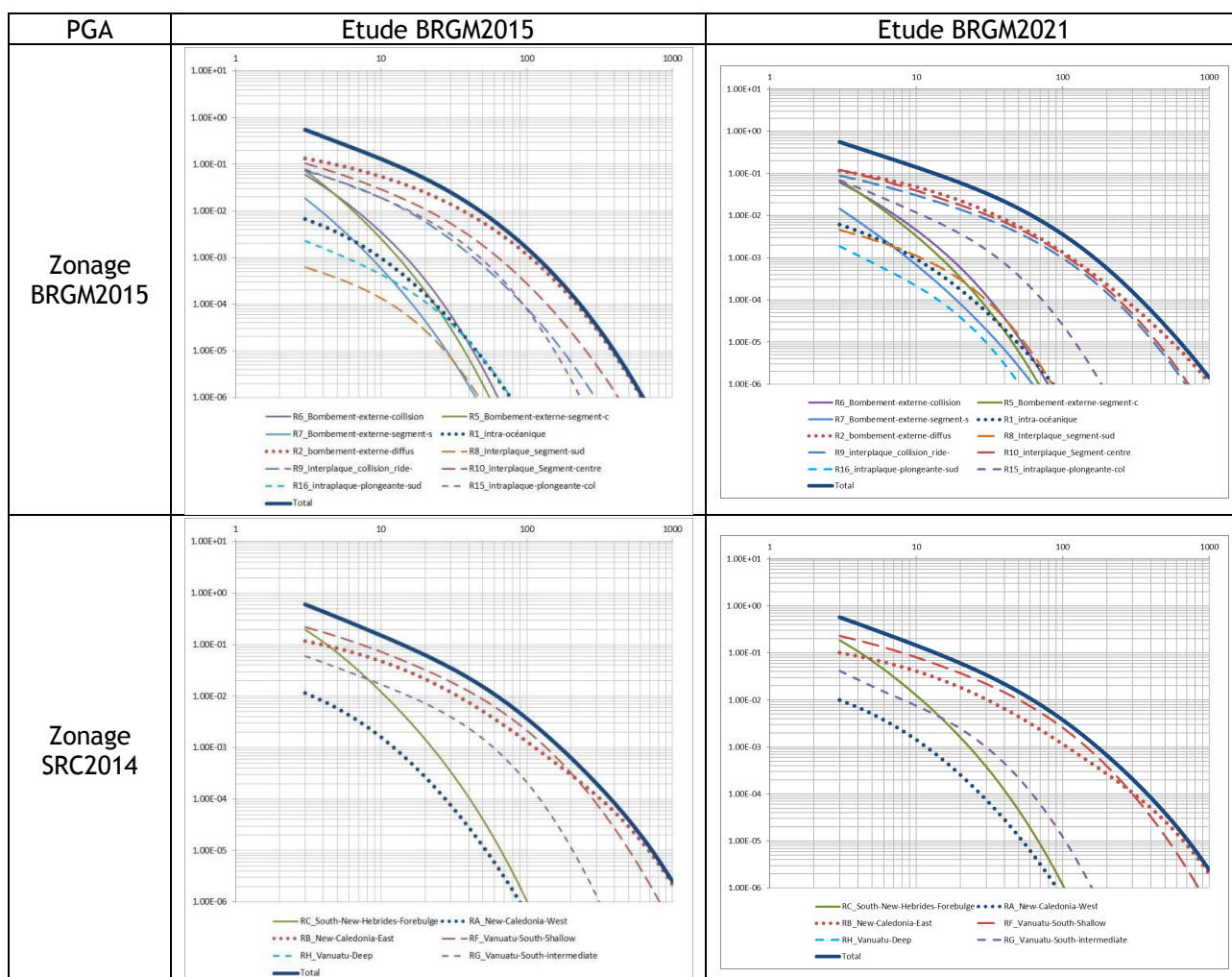


Figure 11 : Contributions des différentes zones considérées dans les études BRGM2015 (à gauche) et BRGM2021 (à droite) à la courbe d'aléa pour une période spectrale de 0 s (PGA) au site KO2

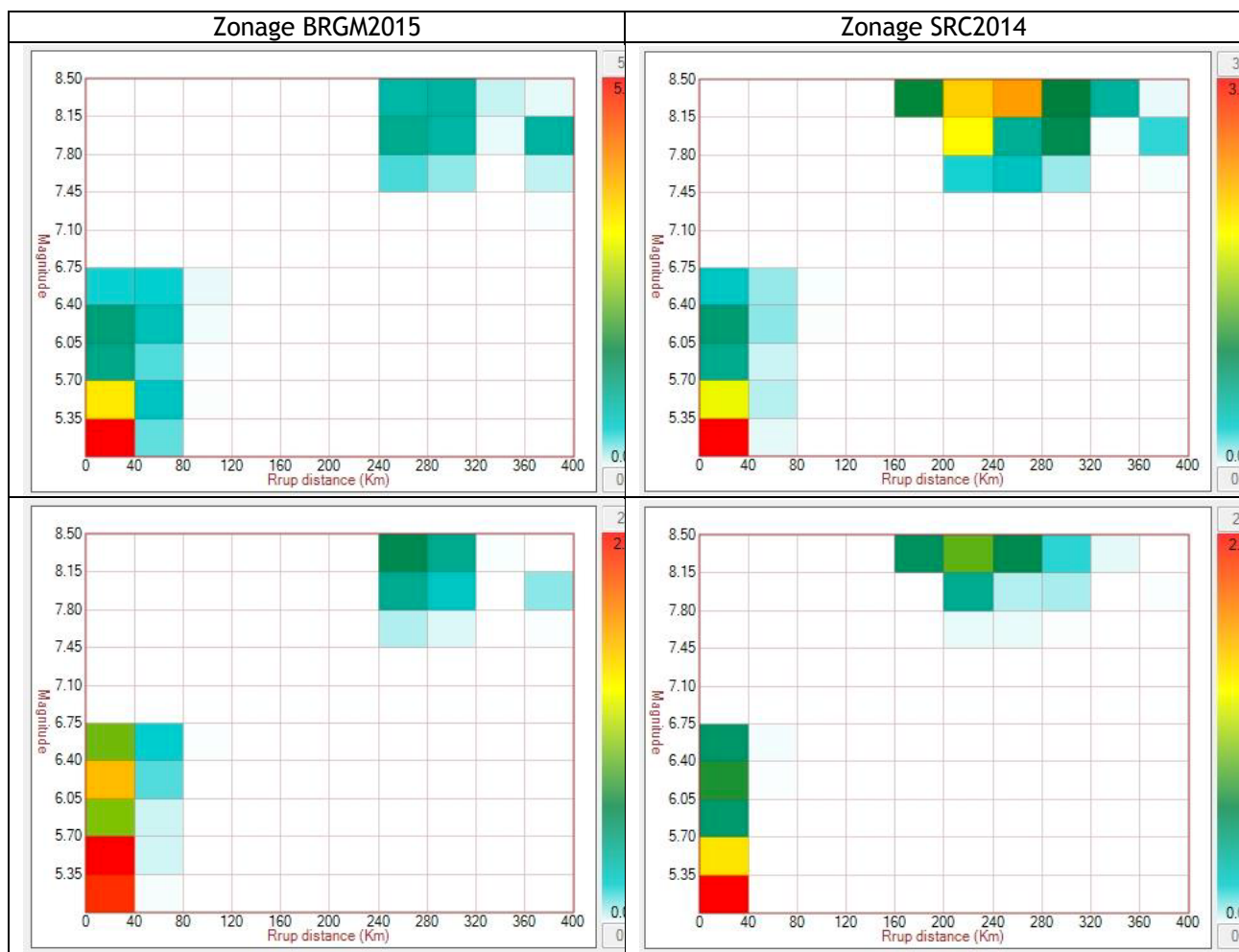


Figure 12 : Désagrégation de l'aléa courte période (PGA) pour l'étude BRGM 2015 à 500 ans (haut) et 10000 ans (bas), et pour chacun des deux zonages considérés (BRGM2015 à gauche et SRC2014 à droite)

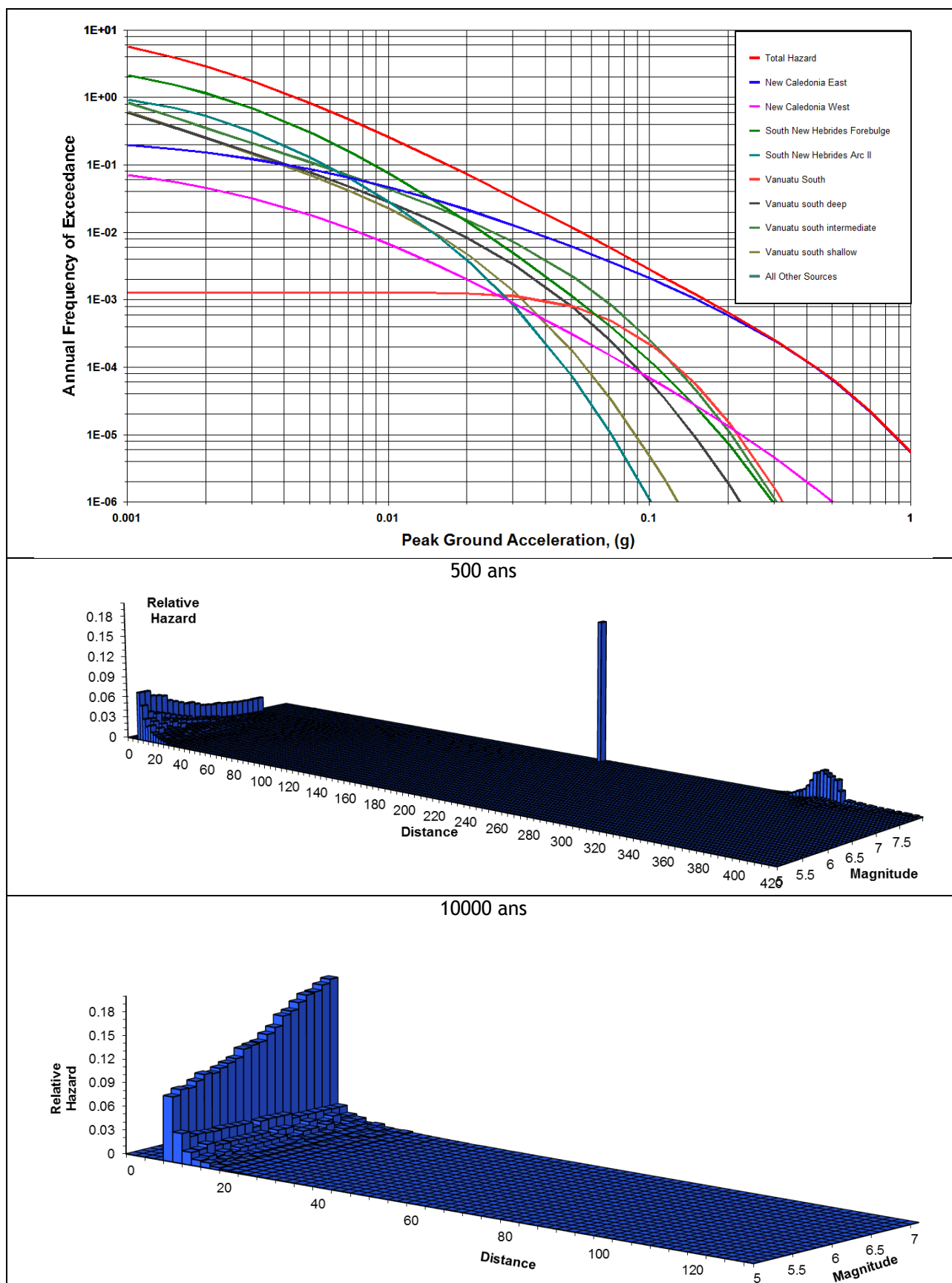


Figure 13 : Résultats de désagrégation du PGA pour l'étude SRC2014 : contribution de chacune des zones à l'aléa total en haut, contributions des différents couples (magnitude-distance) pour une p^eriode de retour de 500 ans (milieu) et 10000 ans (en bas).

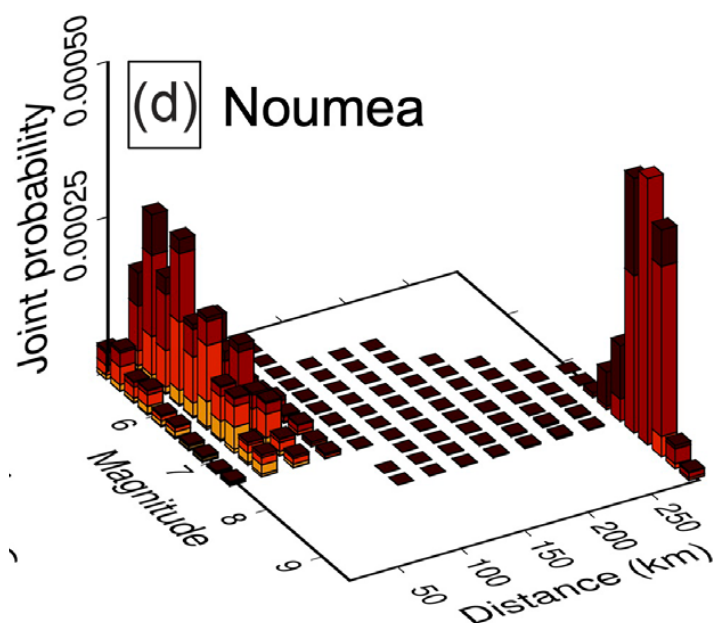


Figure 14 : Résultats de la désagrégation en (magnitude-distance-epsilon) pour le PGA à Nouméa dans l'étude JPS2021, pour une période de retour de 500 ans

5.3.2 Aléa Longue période /basse fréquence : SA (1 s)

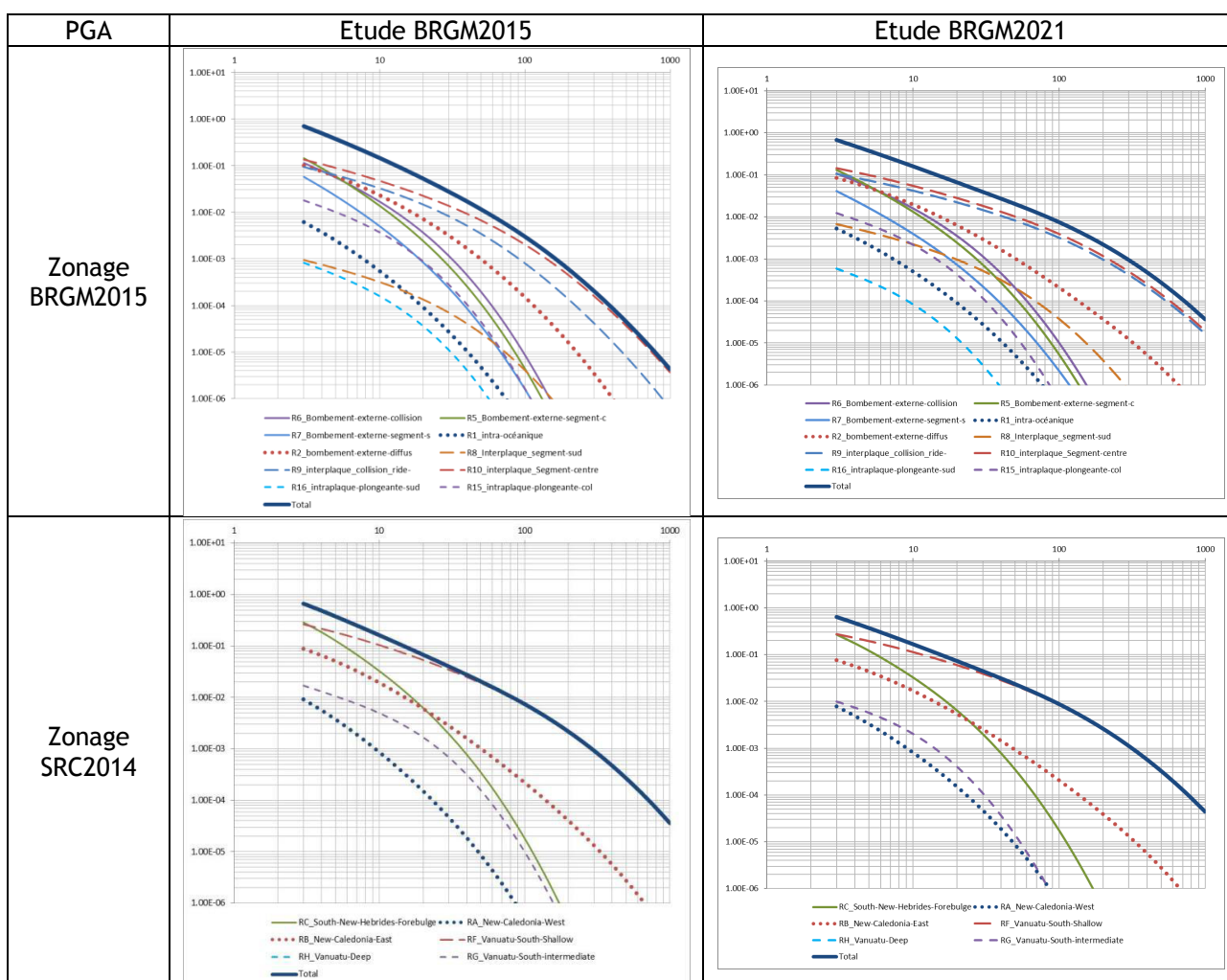


Figure 15 : Contributions des différentes zones considérées dans les études BRGM2015 (à gauche) et BRGM2021 (à droite) à la courbe d'aléa pour une période spectrale de 1s au site KO2

La Figure 15 est l'analogue de la Figure 11, et la Figure 16 celle la Figure 12, pour ce qui concerne le contenu plus longue période (ordonnée spectrale à 1s). Seules les études BRGM2015 et BRGM2021 fournissent ce résultat. On y voit très clairement la prédominance très nette, quelle que soit la période de retour considérée (OBE ou SEE), de la contribution des sources lointaines de subduction, ce qui est parfaitement conforme aux attentes puisque ce sont ces zones qui produisent les plus fortes magnitudes qui sont aussi beaucoup plus riches en mouvements longue période. Les modèles de récurrence pour ces zones très actives sont assez bien contraints en raison de leur activité soutenue, par contre l'estimation des mouvements résultants au site KO2 est très sensible à la GMPE choisie : les réserves émises sur la pertinence des GMPE AB03 et Zea06 à forte magnitude, ainsi que la comparaison avec les résultats JPS2021 utilisant une GMPE subduction plus récente (Aea16), m'amène à recommander l'utilisation de cette dernière au moins pour un test de sensibilité.

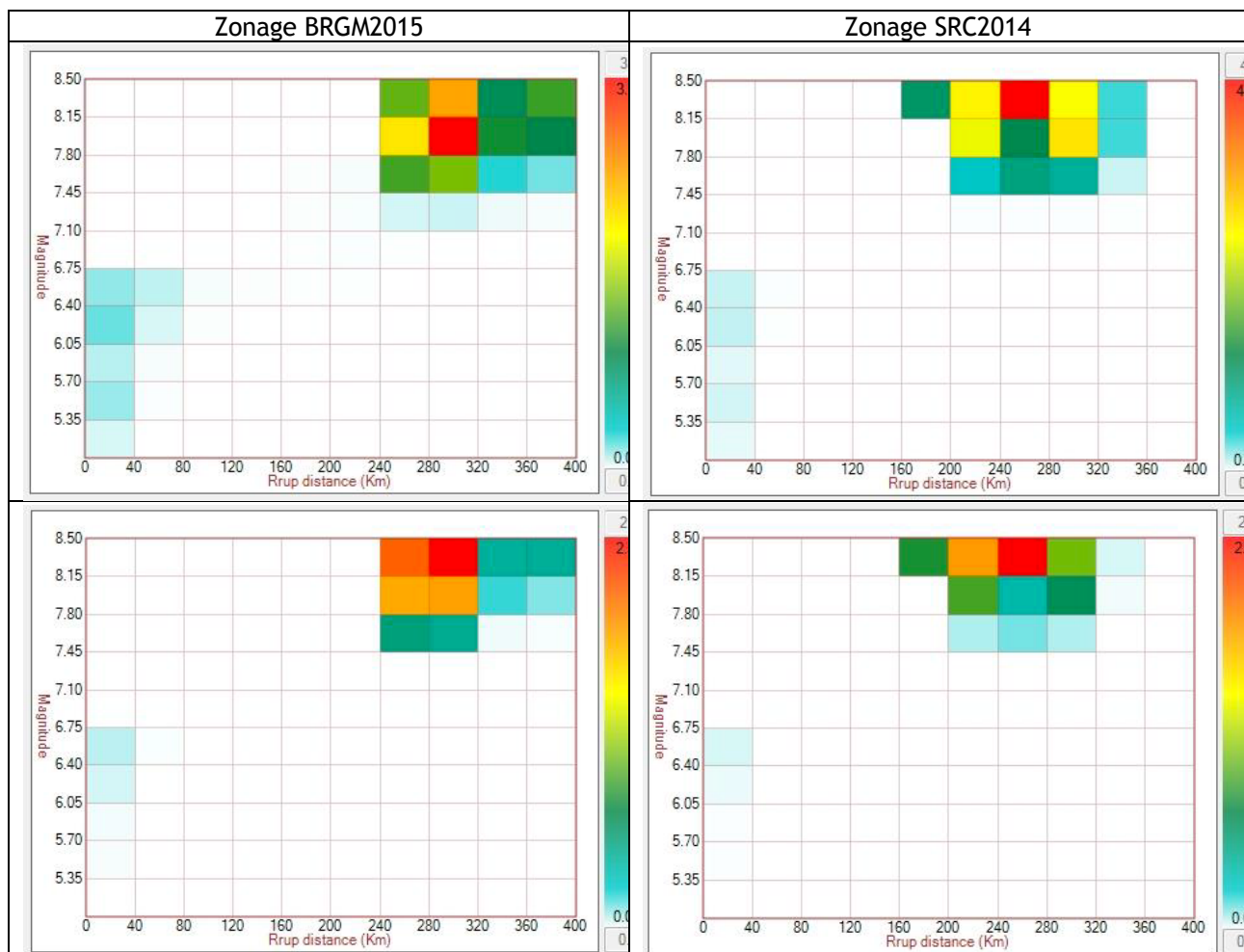


Figure 16 : Désagrégation de l'aléa à une période spectrale de 1s pour l'étude BRGM 2015 à 500 ans (haut) et 10000 ans (bas), et pour chacun des deux zonages considérés (BRGM2015 à gauche et SRC2014 à droite)

Par ailleurs, cette différenciation très nette entre contributions longue et courte période, jointe à la forme très particulière "à 2 pics" du spectre UHS (cf. Figure 9 et Figure 10) incite fortement à séparer les contributions des sources proches et lointaines dans les analyses dynamiques, et donc dans le choix des scénarii pour le choix des accélérogrammes et leur ajustement spectral (cf plus loin § 5.5).

5.4 Etudes de sensibilité (BRGM2015)

L'étude BRGM2015 est la seule à intégrer une étude de sensibilité assez fouillée qui peut éclairer la compréhension des différences entre les niveaux d'aléa estimés par différentes références (cf. ci-dessus Figure 8 et Figure 9). Cette étude comprend une analyse de la sensibilité à quelques paramètres de source (zonage, paramètres d'activité de la zone locale, magnitude minimale M_{\min} , magnitude maximale M_{\max}), et aux GMPE, pour un site rocheux avec V_{s30} autour de 1000 m/s. Les résultats en sont brièvement rappelés ci-dessous, ainsi que les enseignements que l'on peut en tirer sur la comparaison avec les autres études.

5.4.1 Délimitation des zones sources

L'étude BRGM2015 utilise deux zonages différents (BRGM2015, adapté de celui pour l'étude sur l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie en 2008, et celui utilisé dans l'étude SRC2014), et indique que ce dernier donne, pour le SEE, des résultats sensiblement supérieurs : +60% pour le PGA à 10000 ans, et +88% pour SA(1 s). Ces sensibilités sont un peu plus faibles à période de retour plus réduite (1000 ans : +40% pour le PGA, +80% pour SA(1 s)). Même si cette sensibilité semble surtout liée à la contribution des Vanuatu, cela montre l'importance de prendre en compte l'incertitude épistémique sur les zonages sismotectoniques, et donc d'en considérer plusieurs dans l'arbre logique.

5.4.2 Sismicité locale et lois de récurrence locales

Les analyses de désagrégation mentionnées plus haut indiquent toutes le contrôle de l'aléa courte période (PGA, Sa(T) pour $T \leq 0.3$ s) pour le SEE (10 000 ans) par la sismicité locale. Même s'il est difficile de comparer les modèles d'occurrence d'une étude à l'autre voire d'un zonage à l'autre, cela est néanmoins possible pour les études BRGM et SRC2014 grâce à l'information donnée dans les études BRGM sur les taux surfaciques (taux d'occurrence de la zone entière, rapportés à la surface de la zone). Ils sont illustrés sur la Figure 17 en tenant compte des formes fonctionnelles considérées pour la troncature à la magnitude maximale, et des valeurs de M_{\max} considérées dans chaque étude comme listé dans le Tableau IV.

On y voit d'assez fortes différences entre les modèles d'occurrence pris en compte dans les études BRGM2008, BRGM2015 et BRGM2021 (quasiment similaires), et SRC2014. C'est cette dernière étude qui donne les taux surfaciques locaux les plus forts pour les magnitudes au-delà de 5.5 (en raison de la valeur de b autour de 1, c'est-à-dire la pente la plus faible), alors que les taux les plus faibles correspondent à l'étude BRGM2008. Les taux BRGM2021 sont par ailleurs légèrement supérieurs aux taux BRGM2015, surtout pour la zone RB (traits pointillés). Cette hiérarchie est en lien direct avec les PGA à 10000 ans obtenus dans chacune de ces études (SRC2014 >> BRGM2021 > BRGM2015 > BRGM2008). Il semble donc primordial d'utiliser toutes les connaissances disponibles à l'heure actuelle pour contraindre au mieux ces modèles de récurrence.

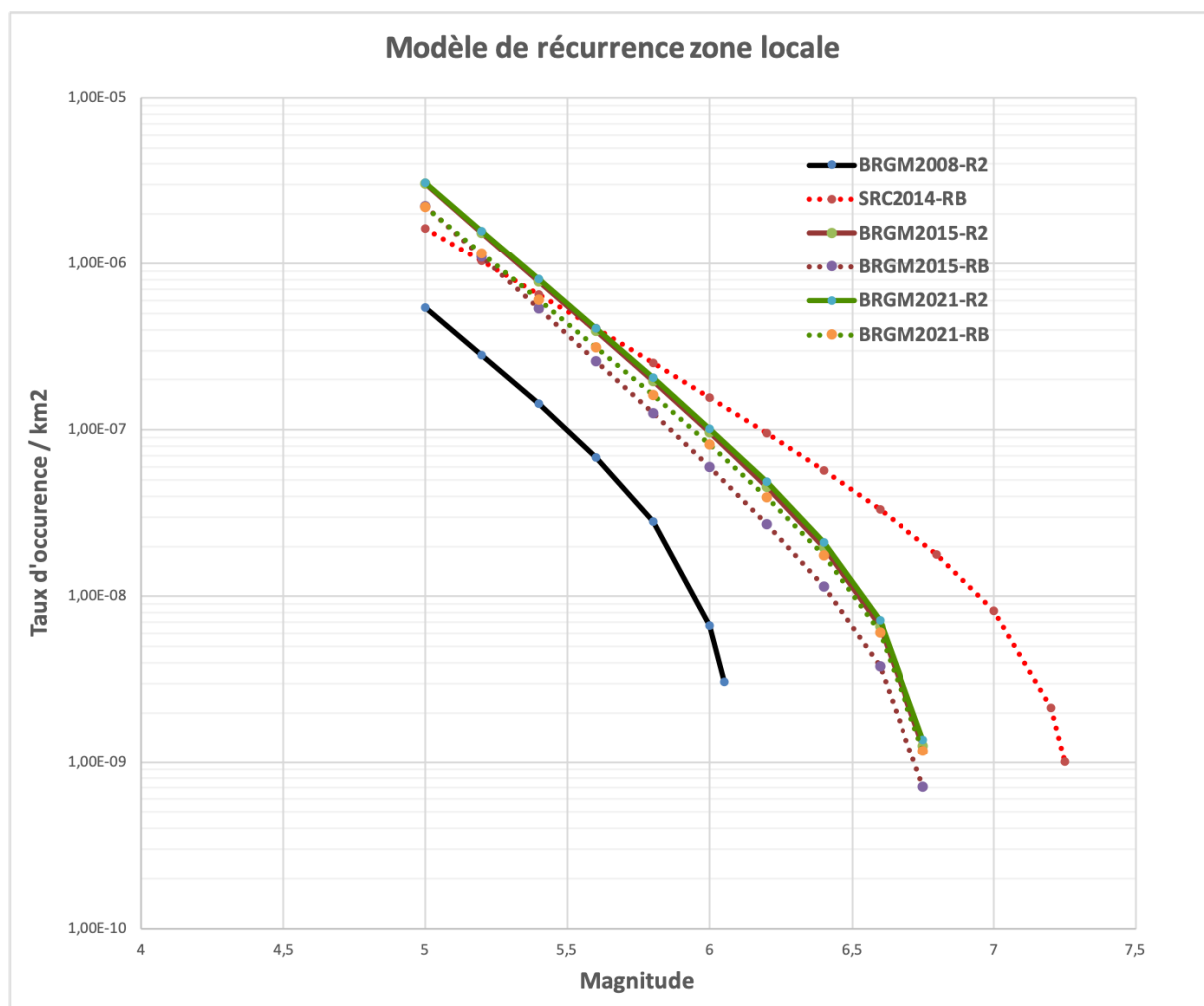


Figure 17 : Modèles de récurrence en taux surfaciques pour les zones locales R2 et RB considérés dans les études BRGM et SRC2014, sous forme d'une relation de Gutenberg-Richter tronquée représentée sur l'intervalle (M_{min} , M_{max})

5.4.3 Sensibilité à M_{max}

L'étude de sensibilité dans BRGM2015 porte sur la valeur de M_{max} dans les 2 zones contrôlant l'aléa (locale et subduction la plus proche). En y faisant varier M_{max} , respectivement, de 6.1 à 6.8 et de 8.1 à 8.6, et en se limitant à deux GMPE (une crustale, BA08 et une subduction, AB03), le PGA augmente de 11% à 10000 ans de période de retour, et SA(1 s) de 25 à 30%. Cette augmentation est plus forte à longue qu'à faible période de retour (8% et 18%, respectivement, pour une période de retour de 500 ans). L'effet de M_{max} est donc au final moins prononcé que celui de la pente du modèle de récurrence local.

5.4.4 Sensibilité à M_{min}

M_{min} n'est pas à proprement parler un paramètre de source, mais surtout un paramètre "de calcul" : il représente la magnitude minimale à partir de laquelle on considère que le mouvement sismique peut être endommageant. Les valeurs généralement considérées dans les études PSHA sont entre 4 et 5 ; le guide ANCOLD2019 mentionne la valeur de 5, celui de l'AFPS recommande une valeur de 4.5. La sensibilité rapportée dans l'étude BRGM2015 est étonnamment forte : elle est autour de 50-60% quand on passe de $M_{min}=5$ à $M_{min}=4$ pour le PGA à toutes les périodes de retour (ce qui est relativement normal en cas de source proche, puisque des séismes de magnitude modérée peuvent générer des mouvements assez riches en hautes fréquences, comme par exemple lors du récent séisme du Teil du 11/11/2019), mais aussi de l'ordre de 60 à 80% pour SA (1 s), ce qui est plus étonnant : cela peut éventuellement provenir d'une GMPE subduction trop ancienne (AB03) et mal calibrée. Quoi qu'il en soit, cette forte sensibilité incite à tester la réponse de l'ouvrage à un accélérogramme correspondant à un séisme modéré proche, avec accélération assez forte et durée très courte.

5.4.5 Sensibilité aux GMPE

Les tests de sensibilité de l'étude BRGM2015 ne portent que sur des GMPE considérées maintenant comme relativement anciennes (trois GMPE de la génération NGA2008, AB03 et Zea06). Néanmoins il est instructif de noter que la sensibilité à haute fréquence est limitée (15-30%) et contrôlée au premier ordre par les GMPE de zone active superficielle, tandis que celle à plus longue période (SA (1 s)) est beaucoup plus forte (facteur 2.2 entre AB03 et Zea06), ce qui souligne l'intérêt pour une mise à jour avec les GMPE subduction les plus récentes

5.4.6 Spectres CMS

Le dernier test de sensibilité concerne la définition retenue pour le spectre : à côté des spectres "UHS" présentant une équi-probabilité de dépassement pour chaque période spectrale, on peut aussi considérer des spectres "CMS" (spectres conditionnés moyens), qui sont conditionnés à une période spectrale donnée. Dans le premier cas (UHS), les scénarii contrôlant l'aléa peuvent être très différents d'une période spectrale à l'autre, comme illustré dans le § 5.3 sur la désagrégation, ce qui conduit à des spectres n'ayant pas de "réalité physique" puisqu'ils ne correspondent pas à un même scénario sismique. Dans le second cas au contraire, on se fixe une période spectrale T_0 d'intérêt particulier (0 s pour les hautes fréquences, ou bien la période propre de l'ouvrage), on considère le niveau $SA(T_0)$ correspondant à une période de retour donnée (OBE ou SEE), et on calcule le spectre moyen sur toute la bande spectrale conditionné à cette période T_0 , c'est-à-dire la forme moyenne des spectres pour tous les scénarii conduisant à cette valeur de $SA(T_0)$. Les spectres CMS ($T ; T_0$) sont donc inférieurs aux spectres UHS(T) sauf pour $T=T_0$. Les études d'aléa sur KO2 ou KO4 ne fournissent que deux exemples de spectres CMS : l'étude SRC2014 montre le spectre CMS à 10000 ans conditionné à période nulle (PGA), tandis que l'étude BRGM2015 montre le spectre à 10000 ans conditionné à ce qui est donné comme la période propre probable de l'ouvrage, à savoir $T_0=1.2$ s. Les spectres correspondants sont illustrés sur la Figure 19, avec les spectres UHS correspondants : on voit très clairement le contenu sensiblement moins riche en longues périodes pour le spectre $CMS_{SRC2014}(T ; T_0 = 0 \text{ s})$, et parallèlement le contenu beaucoup plus pauvre en courtes périodes pour le spectre $CMS_{BRGM2015}(T ; T_0=1.2 \text{ s})$.

On peut noter que le guide ANCOLD2019 recommande (item 7 p.5) la considération de trois ou quatre CMS centrés sur les périodes d'intérêt pour l'ouvrage.

5.5 Accélérogrammes

La réalisation de calculs dynamiques non-linéaires nécessite des accélérogrammes temporels, qui soient compatibles avec les spectres retenus pour les événements OBE ou SEE. La procédure « classique » consiste alors à sélectionner un certain nombre d'accélérogrammes naturels correspondant aux scénarii (magnitude-distance) indiqués par l'analyse de désagrégation, et d'utiliser une procédure d'ajustement de ces signaux pour que leur spectre corresponde aux spectres de dimensionnement.

5.5.1 Sélection / scénarii

Dans l'étude BRGM2015, les spectres cibles sont les spectres médians à 500 ans (OBE) et 10000 ans (SEE), et l'étude de désagrégation correspond à ces niveaux. Dans l'étude BRGM2021, ce sont les spectres moyens aux périodes de retour 500 ans pour l'OBE, et 10000 ans pour le SEE.

Le parti pris dans chacune des études est de considérer des scénarii à la fois « proches superficiels » et « lointain subduction », de sélectionner quelques accélérogrammes réels correspondant à ces scénarii dans les bases de données existantes, et d'ajuster chacun de ces accélérogrammes aux spectres cibles retenus. L'étude BRGM2015 considère 8 accélérogrammes de base (N1 à N8), dont 7 pour un séisme modéré proche et 1 pour un séisme de subduction à distance intermédiaire (75 km), et les ajuste successivement à chacun des spectres OBE et SEE. L'étude BRGM2021 considère un nombre d'accélérogrammes légèrement plus faible pour chaque spectre cible (6 au lieu de 8), mais différencie le choix des accélérogrammes de base suivant le niveau de dimensionnement (OBE ou SEE).

Les sélections correspondantes sont listées dans le Tableau VIII, et leur répartition dans le plan distance-magnitude illustrée sur la Figure 18. Quand on compare cette figure aux résultats de désagrégation illustrés sur les figures 12 et 16 on peut faire les constatations suivantes :

- Les sélections BRGM2015 et BRGM2021 sont assez différentes, mais les choix BRGM2015 semblent a priori plus pertinents pour les séismes locaux : les magnitudes modérées entre 5 et 6.5 et les distances inférieures à 40-50 km sont plus cohérentes avec la Figure 12, au contraire des magnitudes plus fortes (6.5-7.5) et les distances intermédiaires (50-120 km) de la sélection BRGM2021.
- Dans aucune des sélections ne figure d'enregistrement correspondant à la subduction lointaine (200 à 300 km, $M \geq 7.8$, cf. Figures 12 et 16). Le seul signal associé à un séisme de subduction est celui du séisme de Michoacan dans la sélection BRGM2015, mais son lieu d'enregistrement est trop proche de l'hypocentre pour correspondre à la configuration Vanuatu / Grande-Terre.
- Il semble donc que ces sélections soient guidées par un impératif de « compromis » entre les deux types de scénario contrôlant l'aléa.

Tableau VIII : Liste des accélérogrammes de base retenus dans les études BRGM2015 et BRGM2021

Etude	Spectre cible	Signal	Séisme, date	M_w	R_{rup} (km)	Station
BRGM2015	SEE = UHS10000 Médian	N1	San Francisco 1957 (CA, USA)	5.3	11	Golden Gate Park
	OBE = UHS500 Médian	N2	Coyote Lake 1979 (CA, USA)	5.7	10.7	Gilroy Array #1
		N3	Whittier Narrows 1987 (CA, USA)	6.0	27.6	LA - Wonderland Ave
		N4	Sierra Madre 1991 (CA, USA)	5.6	39.8	Vasquez Rocks Park
		N5	Réplique Northridge 1994 (CA, USA)	5.3	21.7	LA - Griffith Park Observatory
		N6	Parkfield 2004 (CA, USA)	6.0	5.3	Parkfield - Turkey Flat #1 (OM)
		N7	Umbria 1984 (Italie)	5.6	15.7	Gubbio
		N8	Michoacan 1985 (Mexique)	8.0	75.0 (Rhypo)	Caleta de Campos
BRGM2021	OBE = UHS500 moyen	OBE1	Loma Prieta 1989 (CA, USA)	6.93	73	Piedmont Jr High School Grounds
		OBE2	Loma Prieta 1989 (CA, USA)	6.93	74.14	SF - Rincon Hill
		OBE3	Chi-Chi 1999, Taiwan	7.62	118.34	TAP046
		OBE4	Chi-Chi 1999, Taiwan	7.62	109.27	TAP075
		OBE5	Chi-Chi 1999, Taiwan	7.62	58.09	TCU085
		OBE6	Tottori 2000, Japon	6.61	15.23	OKYH07
	SEE = UHS10000 moyen	SEE1	Loma Prieta 1989 (CA, USA)	6.93	74.14	SF - Rincon Hill
		SEE2	Northridge 1994 (CA, USA)	6.69	23.64	Vasquez Rocks Park
		SEE3	Kocaeli 1999 (Turquie)	7.51	7.21	Izmit
		SEE4	Chi-Chi 1999 (Taiwan)	7.62	109.27	TAP075
		SEE5	Tottori 2000 (Japon)	6.61	15.59	SMNH10
		SEE6	Iwate 2008 (Japon)	6.9	16.27	IWT010

5.5.2 Recommandations

Plutôt qu'un tel compromis, il me semblerait préférable de sélectionner deux jeux d'accélérogrammes très distincts, l'un correspondant à des séismes modérés proches, et l'autre à de très forts séismes lointains, et d'adapter chacun de ces jeux à des spectres distincts, le premier riche en courtes périodes et comprenant très peu de longues périodes, et l'inverse pour le second. Le premier ne comprendrait que des signaux assez courts, et le second des signaux longs, mais sans fortes accélérations. Un moyen de calibrer les deux spectres cibles serait de considérer des spectres "CMS" au lieu de spectres "UHS", avec un spectre CMS conditionné au contenu courte période (0s / PGA ou SA (0.1 s)) pour le scénario modéré proche, et l'autre conditionné au contenu longue période (autour de 1 s) pour le scénario fort lointain, en s'assurant que l'enveloppe de ces deux spectres corresponde au spectre UHS. Des exemples de CMS(T ; $T_0=0$ s) (SRC2014) et CMS(T ; $T_0=1.2$ s) (BRGM2015) sont représentés sur la Figure 19. On y voit les très grosses différences entre les spectres UHS de référence (trait plein), et les spectres CMS (trait pointillé).

Par ailleurs, compte tenu des différences de choix entre les études BRGM2015 (spectre médian) et BRGM2021 (spectre moyen), il apparaît nécessaire aussi de clarifier avec les autorités de contrôle quel doit être le niveau cible, UHS moyen ou médian, car les différences entre les deux sont très importantes (cf. Figure 10). Les documents techniques de référence (ANCOLD2019 p. 66, CT44 de l'AFPS) mentionnent l'utilisation de l'UHS moyen comme la pratique "standard".

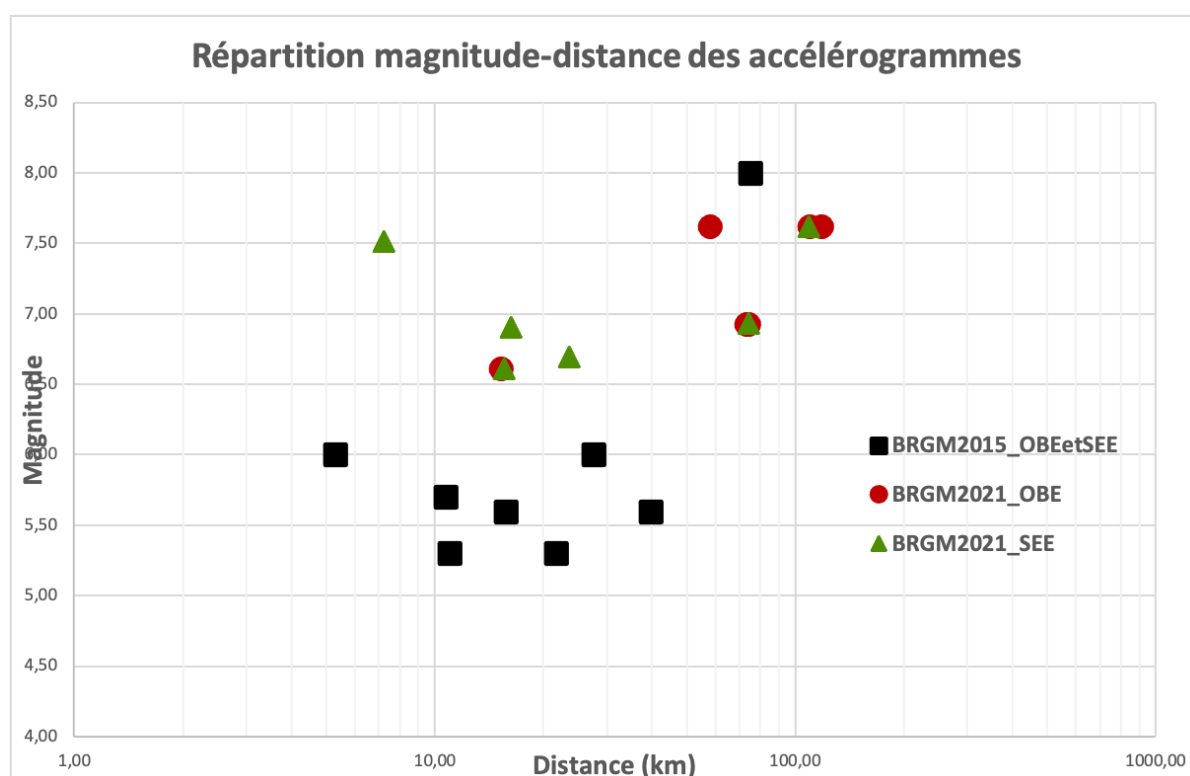


Figure 18 : Répartition distance - magnitude des accélérogrammes retenus dans les études BRGM2015 et 2021

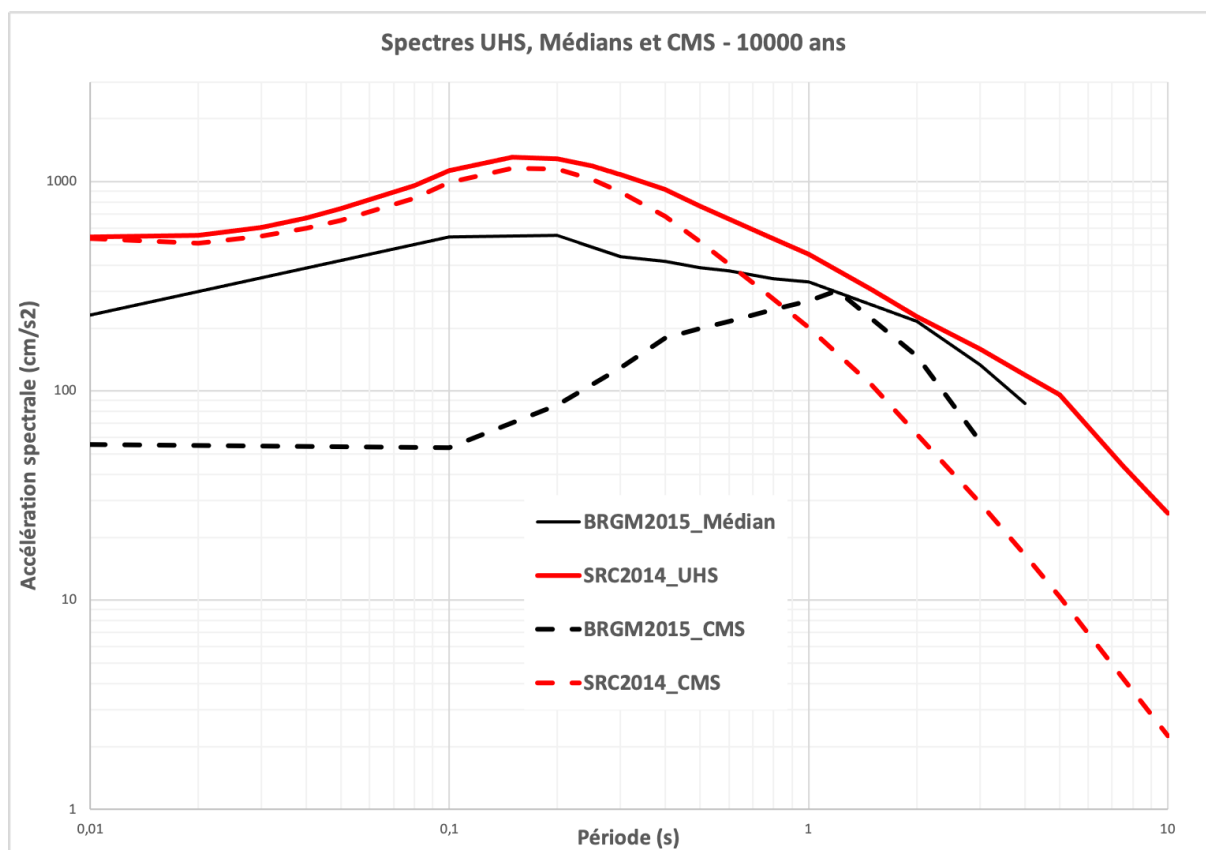


Figure 19 : Comparaison entre spectres UHS (trait plein) et CMS (trait pointillé) à 10000 ans de période de retour, pour les études SRC2014 (rouge) et BRGM2015 (noir). Dans le premier cas, la période de conditionnement est 0 s (PGA), dans le second c'est 1,2 s (période supposée de l'ouvrage)

6 Conclusions "techniques" de l'analyse critique des estimations d'aléa

Au terme de cette analyse comparative des rapports BRGM et des autres études d'aléa sismique récentes (moins de 15 ans) sur le Sud-Ouest Pacifique, il apparaît qu'il s'agit d'une étude conforme à la pratique usuelle des analyses PSHA. Si certaines améliorations "à la marge" sont toujours possibles compte tenu de l'évolution des connaissances et des pratiques, la dispersion des différents résultats disponibles pour le Sud de Grande-Terre est le marqueur du handicap majeur dont elle souffre - comme toutes les autres -, à savoir l'absence d'une synthèse scientifique récente sur les caractéristiques de la sismicité locale. Il en résulte qu'il est actuellement impossible d'avoir une étude PSHA qui soit réellement site-spécifique, mais simplement une analyse régionale se fondant pour l'essentiel sur les données de sismicité mondiale sans pouvoir exploiter pleinement les efforts réalisés depuis quelques décennies pour installer et maintenir des réseaux de surveillance sismologique à vocations locale et régionale.

Les paragraphes suivants rappellent les quelques points qui pourraient faire l'objet d'améliorations ou d'analyse de sensibilité, avant d'en donner un aperçu synthétique avec des indications sur leur temporalité (court ou moyen terme), et une hiérarchisation en ordre de priorité dans la perspective de la réponse aux deux questions rappelées en introduction.

6.1 Modèles de source

6.1.1 Point d'enjeu majeur : Caractéristiques de la sismicité locale

Toutes les études indiquent que l'aléa à longue période de retour est contrôlé, au moins en partie, par la sismicité locale. Dans les estimations du BRGM (comme dans celle de SRC2014, et toutes les autres études considérées qui n'ont cependant qu'un objectif régional et non pas "site-spécifique"), cette "sismicité locale" est associée à une zone de sismicité crustale (R2 ou RB) qui présente deux particularités :

- Son extension spatiale est très vaste ; comme elle inclut un grand domaine océanique à faible densité de stations sismologiques, le catalogue ne peut être complet que pour des magnitudes modérées à fortes (4 ou 5 suivant les études), ce qui nuit à la robustesse des estimations de taux de récurrence
- Les valeurs du coefficient "b" de Gutenberg-Richter dans les modèles de récurrence sont très élevées (autour de 1.5) dans les études du BRGM, alors qu'elles sont plus faibles et plus proches de la valeur "standard" de 1 dans les autres études. Cela a clairement des conséquences sur les valeurs d'aléa à longue période de retour, puisque la fréquence prédite pour les séismes de plus forte magnitude est notablement plus faible dans les modèles BRGM

Par ailleurs, il existe un certain nombre d'arguments géodynamiques et sismo-tectoniques conduisant à attribuer un comportement particulier à la zone sud de Grande-Terre (et ses marges). Il me semble donc nécessaire de s'assurer de la robustesse des résultats BRGM en faisant a minima une étude de sensibilité considérant un zonage sismotectonique plus serré à proximité immédiate du site, ce qui permettrait de plus d'exploiter au mieux les catalogues locaux intégrant de nombreux séismes de magnitude inférieure à 4, et de mieux contrôler la pente "b" des modèles de récurrence (valeur moyenne et incertitudes). En particulier, la présence de 4 stations du réseau IRD encadrant le massif du sud (Yaté, Nouméa, ile Ouen, et ile des pins) fonctionnant depuis 2009, devraient permettre de jeter un pont entre les modèles de récurrence à très faible magnitude élaborés à partir de campagnes temporaires courtes telles que celle de Chin et al (2022), et ceux à plus forte magnitude (au-delà de Mw 4-5) accessibles à partir des données mondiales. Les scientifiques locaux (Service géologique NC, IRD, et leur réseau de collaborateurs) devraient pouvoir fortement contribuer tant pour les données de base, que pour les interprétations sismo-tectoniques.

6.1.2 Autres points susceptibles d'amélioration

6.1.2.1 M_{max}

Compte tenu des différents modes possibles d'évaluation de la magnitude maximale M_{max} dans chaque zone source (magnitude historique maximale + une certaine marge, magnitudes maximales observées de par le monde dans des domaines tectoniquement similaires, longueurs des failles, ...), la pratique actuelle des études PSHA est de considérer une distribution de valeurs de M_{max} , plutôt qu'une seule valeur. L'étude de

sensibilité BRGM2015 montre que cela ne devrait pas changer beaucoup les résultats même pour le SEE, mais cela serait mieux en ligne avec les recommandations de certains guides techniques (CT44 AFPS).

6.1.2.2 M_{min}

La magnitude minimale considérée dans la plupart des études considérées ici est $M_{wmin} = 5$. Cela est plus un choix "par défaut" lié au manque de connaissances sur la sismicité modérée dans la plupart des zones sources, qu'un choix scientifiquement argumenté. Compte tenu des valeurs recommandées dans les guides techniques ($M_{wmin} = 4.5$ pour le CT44 AFPS, 4.5 à 5 pour ANCOLD2019), ce choix pourrait faire l'objet d'une discussion, au moins pour la zone locale, avec les autorités et scientifiques locaux.

6.1.2.3 Robustesse vis-à-vis des algorithmes de declustering

Toutes les études analysées mentionnent une très forte sensibilité du nombre d'événements finalement retenus dans le catalogue à l'algorithme retenu pour le declustering, ainsi qu'aux paramètres de fenêtrage spatio-temporel. Il serait utile d'avoir à minima une étude de sensibilité des paramètres de récurrence (notamment la pente b de la relation Gutenberg-Richter) aux différentes options plausibles pour le declustering, avec une attention particulière à la zone où se trouve le site d'étude.

6.1.2.4 Prise en compte des incertitudes sur les paramètres de récurrence (σ_λ , σ_b)

La façon dont les incertitudes d'une part sur les magnitudes et les localisations de chaque événement, et d'autre part sur les paramètres d'activité λ et b dans chaque zone sont propagées dans le calcul d'aléa n'est pas clairement documentée. En particulier il n'est pas précisé si les incertitudes sur λ et b sont considérées comme corrélées ou non. Des précisions et éventuellement des corrections seraient utiles pour assurer une conformité aux recommandations du guide technique CT44 AFPS.

6.2 Modèle de mouvements du sol

6.2.1 Composante du mouvement

Les études considérées ici ne portent que sur la composante horizontale du mouvement sismique. Les deux guides techniques pris comme référence (ANCOLD 2019 et CT44 AFPS) font les préconisations suivantes pour la prise en compte ou non de la composante verticale :

- Le document ANCOLD2019 précise (§ 2.8 p.8) que "la composante verticale devrait être incluse dans les accélérogrammes temporels et utilisée pour l'analyse dynamique des barrages en remblai et béton". Pour la définition du spectre associé, les commentaires associés p. 84-85 recommandent l'utilisation d'une équation de prédiction du type $V/H = f(M, \text{mécanisme}, R, \text{site})$ plutôt qu'un rapport V/H constant pour passer du spectre horizontal au spectre vertical
- Le CT44 AFPS est moins exigeant et conditionne l'estimation des mouvements verticaux à une sensibilité effective de la réponse de l'ouvrage à cette composante du mouvement. De plus, lorsque cette sensibilité est supposée suffisante pour conduire à leur estimation, le choix est laissé au prestataire d'utiliser des coefficients fixes, indépendants de la période spectrale, pour passer du spectre horizontal au spectre vertical ($V/H = 0.9$ ou 0.8), ou bien des rapports V/H adaptés aux scénarii donnés par la désagrégation sur le mouvement horizontal (comme dans les recommandations ANCOLD2019), ou bien de faire une étude parallèle séparée utilisant des GMPE pour le mouvement vertical.

Il semblerait donc opportun a) d'évaluer la sensibilité de la stabilité de l'ouvrage à la prise en compte ou non de la composante verticale, et si oui b) de commencer par évaluer les mouvements verticaux de manière forfaitaire à partir d'un rapport V/H fixe, soit d'un rapport donné par une équation *ad hoc* en fonction de la -magnitude, de la distance et du mécanisme. La dernière étape c) serait alors de générer des accélérogrammes à 2 ou 3 composantes compatibles avec ces spectres horizontal et vertical, et les scénarii (M,R) découlant de l'analyse en désagrégation.

6.2.2 GMPE utilisées

Même si les GMPE utilisées dans les études BRGM2015 et 2021 sont assez cohérentes avec celles prises en compte dans les autres études sur la région (avec une différence cependant pour la plus récente JPS2021), il serait utile, pour répondre aux questions posées, de s'assurer que les estimations restent stables lorsqu'on utilise les mises à jour les plus récentes, tant pour la sismicité superficielle que pour la sismicité de subduction. Certaines sont proposées ci-dessous

- Sismicité superficielle : GMPE de la génération NGA-W2 de 2014 (Bozorgnia et al., 2014 ; Gregor et al., 2014, données mondiales mais à prédominance Ouest-américaine) ou RESORCE 2014 (Akkar et al., 2014 ; Douglas et al., 2014, données pan-européennes), voire encore plus récent (Kotha et al., 2020)
- Subduction : Compte tenu de la mention récurrente d'une certaine surestimation des GMPE utilisés (AB2003 et Zea2006) à forte magnitude, ainsi que du contrôle partiel des scénarii de subduction pour l'aléa sismique à longue période (autour de 1s, période a priori proche de la période fondamentale de l'ouvrage), l'utilisation de Aea2016 (voire de son update de 2018) serait bienvenue.

Par ailleurs, compte tenu de l'existence sur Grande Terre de quelques stations accélérométriques, ainsi que d'autres stations (permanentes ou temporaires), les enregistrements existants pourraient être utilisés pour tester l'adéquation des différentes GMPE utilisées. Certes, leur faible nombre ne permet pas de construire de GMPE spécifiques à Grande-Terre, mais cela peut néanmoins fournir des indications qualitativement intéressantes.

6.2.3 Variabilité aléatoire

Dans la mesure où l'étude d'aléa est site-spécifique, il serait intéressant d'avoir une estimation de l'aléa en utilisant la valeur réduite ("single-site sigma") de la variabilité aléatoire. Cela constitue un argument supplémentaire pour l'utilisation des GMPE les plus récentes, qui fournissent directement les valeurs des différents termes de la variabilité aléatoire.

Cela implique cependant de bien individualiser l'effet spécifique du site de l'ouvrage, et de prendre en compte les incertitudes épistémiques associées aux incertitudes sur les paramètres dynamiques des formations superficielles présentes sur le site (et notamment les sols latéritiques en place, la "zone de transition" et la saprolite terreuse).

6.3 Type de résultats

6.3.1 Sensibilité à la version logicielle

Le BRGM ayant mentionné lui-même l'éventualité d'une sensibilité des résultats d'aléa à la version logicielle utilisée (différente en 2015 et en 2021), il importe de clarifier et quantifier exactement cette sensibilité en faisant tourner les modèles 2015 avec la version 2021 du logiciel.

6.3.2 Moyenne / médiane

La configuration particulière du site KO2, caractérisée par un aléa sismique "bimodal" contrôlé à haute fréquence par la sismicité locale, et à basse fréquence par les sources de subduction lointaine, conduit à des différences notables entre les UHS moyens et médians. La sélection du type de spectres retenus pour le dimensionnement et l'ajustement des accélérogrammes diffère entre l'étude BRGM2015, pour laquelle les spectres cibles sont les spectres médians à 500 ans (OBE) et 10000 ans (SEE), et l'étude BRGM2021, où ce sont au contraire les spectres moyens aux périodes de retour 500 ans pour l'OBE, et 10000 ans pour le SEE. Ce dernier choix de 2021 est plus conforme aux recommandations des guides techniques de référence (ANCOLD2019 p. 66, CT44 de l'AFPS) qui mentionnent l'utilisation de l'UHS moyen comme la pratique "standard" permettant d'accorder suffisamment de poids aux quelques branches de l'arbre logique qui conduisent à de fortes valeurs d'aléa.

C'est cependant une décision assez lourde de conséquences, et il importe que ce choix soit décidé en pleine connaissance des enjeux et de la pratique, en concertation avec les autorités de contrôle.

6.3.3 UHS / CMS

Un autre sujet, peu abordé dans les études considérées, concerne le choix des types de spectres (UHS ou CMS) à considérer pour la sélection et l'ajustement spectral des accélérogrammes temporels. Le choix du BRGM a été de prendre les spectres UHS et d'y ajuster des accélérogrammes correspondant à divers scénarii, du séisme (relativement) modéré et (relativement) proche au séisme (relativement) fort et (relativement) lointain.

Les préconisations des référentiels techniques sont les suivantes

- Le document ANCOLD2019 précise (item 7 du § 2.5 p.5) que "une suite de 3 à 4 spectres CMS conditionnés sur diverses périodes représentant toute la gamme du spectre UHS *peut* être utilisée comme cible pour l'ajustement des accélérogrammes temporels" en ajoutant qu'en aucun cas il ne peut être fait usage que d'un seul CMS conditionné sur une seule période spectrale. Dans la partie

commentaire (p.68), il est stipulé que l'utilisation de CMS peut être un "remède" au conservatisme excessif induit par l'utilisation de spectres cibles UHS lorsque les différences entre moyenne et médiane sont importantes (ce qui est le cas pour KO2, surtout dans les résultats BRGM2021). Des exemples de recommandations sur le choix des périodes de conditionnement (0, 0.5 1.0 et 2.0s) sont présentés p. 69-70.

- Le CT44 de l'AFPS ouvre la porte (p.35-36) à l'utilisation de spectres CMS, en concertation avec le donneur d'ordre, mais sans aucune obligation ni de consignes fortes sur le nombre de périodes spectrales de conditionnement à considérer.

6.3.4 Mode de sélection et d'ajustement spectral des accélérogrammes

La suite logique des deux paragraphes précédents est alors de modifier assez significativement la procédure suivie par le BRGM pour le choix et l'ajustement des accélérogrammes temporels. Plutôt que de considérer des scénarii qui soient un "compromis" assez intermédiaire (cf. Figure 18) entre les scénarii très différenciés indiqués par l'analyse en désagrégation (cf. Figure 12 et Figure 16), et d'ajuster les accélérogrammes correspondants à l'ensemble du spectre UHS, il semblerait plus physique de suivre les préconisations ANCOLD2019, c'est-à-dire

- considérer plusieurs CMS (T ; T_{0i}) à diverses périodes T_{0i} ,
- faire les analyses de désagrégation correspondant à chacune de ces périodes T_{0i} , conduisant à des scénarii différents (d'autant plus proche et modéré que T_{0i} est plus faible),
- sélectionner des jeux d'accélérogrammes spécifiques à chacun de ces scénarii (donc un jeu pour chaque période spectrale T_{0i}),
- ajuster spectralement chacun de ces jeux au spectre CMS (T ; T_{0i}) correspondant.

Cela fait sans doute un peu plus d'analyses dynamiques temporelles ou linéaire équivalent mais chacune d'elles sera moins conservatrice que celles basées sur les spectres UHS. En outre seules les analyses correspondant aux spectres CMS conditionnés par des spectres T_{0i} à très courte période (0 ou 0.1 s) seraient susceptibles d'évoluer notablement en fonction des analyses plus poussées de la sismicité locale. L'aléa aux périodes supérieures à 0.3 s étant apparemment essentiellement contrôlé par la sismicité lointaine de subduction, qui est d'ores-et-déjà bien connue, les analyses dynamiques correspondantes ont beaucoup plus de chance de rester valables pendant assez longtemps.

6.4 Site

Cet aspect n'est évoqué nulle part dans les études du BRGM (ce n'était sans doute pas dans leur mandat) : il en résulte que les estimations d'aléa fournies correspondent à du "rocher standard", c'est-à-dire à du rocher affleurant caractérisé par une vitesse d'onde S moyenne sur les 30 m superficiels (V_{S30}) de l'ordre de 750 à 1000 m/s.

La synthèse géologique préliminaire du site exposée dans le rapport MECATER MC-21-301–PRNC–01-R103, indique la présence de formations meubles sous l'ouvrage, en épaisseur variable mais pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres, formations dont l'effet est pris en compte pour les calculs de stabilité dynamique de l'ouvrage par le biais d'une modélisation linéaire équivalente. L'expérience montre que ce genre de modélisation est très sensible aux paramètres dynamiques retenus notamment pour les formations les plus molles (vitesse d'ondes S, amortissement, et courbes de dégradation non-linéaire), et les derniers résultats de comparaison simulation / observations indiquent que cette approche "linéaire-équivalente" classique a tendance à sous-estimer les mouvements en surface lorsque les déformations en cisaillement dépassent un certain seuil (0.1%). Je recommande donc les vérifications suivantes

- Calcul des niveaux de déformation en cisaillement atteints dans les formations les plus meubles et comparaison aux seuils de validité (0.1 - 0.5%)
- Établissement de plusieurs jeux "plausibles" de paramètres dynamiques, et analyse de la sensibilité des calculs de réponse dynamiques à ces paramètres : la réponse de site est elle aussi affectée d'incertitudes épistémiques qu'il convient d'estimer, surtout si on veut pouvoir estimer un aléa au rocher estimé avec une variabilité aléatoire réduite ("single-site sigma").
- Accorder une attention particulière, pour cette analyse de sensibilité, à la formation peu épaisse à faibles caractéristiques mécaniques (saprolite terreuse G1 / zone de transition F, éventuellement avec aussi la latérite / limonite E) "pincée" entre des formations plus raides, qui peut conduire à des effets très particuliers caractérisés par une amplification basse fréquence et un filtrage des hautes fréquences.

- Des mesures complémentaires in-situ (suspension logging en forage, mesures ponctuelles H/V bruit de fond, voire mesures de vibrations ambiantes en réseau de surface) pourraient permettre de confirmer la fiabilité des jeux de données considérés (profils $V_s(z)$ haute résolution, fréquences de résonance du site et/ou de l'ouvrage sur son assise, compatibilité des profils $VS(z)$ avec les courbes de dispersion mesurées), ainsi que de trancher rapidement sur l'existence ou non d'effets particuliers liés à une couche fine à moindre vitesse "pincée" entre des formations plus rigides. Par rapport aux mesures déjà effectuées (SCPTu, SDMT), ces nouveaux types de mesure permettent soit d'avoir une bien meilleure résolution en profondeur à même de bien identifier les zones à moindre vitesse de faible épaisseur (suspension logging), soit de fournir une mesure "intégrée" des effets de propagation (bruit de fond) donnant des indications à la fois sur les propriétés moyennes moins perturbées par la variabilité spatiale à courte longueur d'onde, et surtout allant jusqu'à beaucoup plus grande profondeur que les mesures géotechniques classiques (jusqu'au bedrock sismique, à quelque profondeur qu'il soit).

A côté de ces recommandations de court terme, une autre serait l'installation d'au moins deux (voire plus) capteurs sismologiques sensibles sur le site (affleurement des péridotites, fond de vallée, voire en fond de forage et en crête de l'ouvrage) qui permettrait à échéance d'un à deux ans d'avoir des enregistrements suffisamment nombreux pour contrôler et ajuster les modèles utilisés (GMPE, site et réponse dynamique de l'ouvrage, outils de simulation 1D), et légitimer l'utilisation d'une variabilité aléatoire réduite ("single-site sigma").

6.5 Liste récapitulative des recommandations sur le modèle d'aléa

Le Tableau IX récapitule l'ensemble des suggestions évoquées dans les paragraphes précédents, en donnant aussi des indications sur la temporalité de leur réalisation (court terme / quelques semaines, moyen terme / quelques mois, long terme / quelques années), et en leur attribuant un ordre de priorité subjectif qu'il faudra discuter avant de produire la version finale de cette expertise.

Tableau IX : Liste récapitulative des améliorations possibles sur le modèle d'aléa, avec indications sur leur temporalité (court, moyen ou long terme), une hiérarchisation en priorité, ainsi que les conséquences probables sur le niveau de l'aléa (lorsque cela est possible)

Sujet		Temporalité			Ordre de priorité	Conséquences probable sur l'aléa estimé
		Court terme (semaines)	Moyen terme (mois)	Long terme (années)		
Modèle de source	Prise en compte d'une zone-source locale		x		1	? ↗
	Prise en compte d'une distribution M_{max}	X			3	?
	Propagation des incertitudes de magnitude et localisation dans l'établissement des modèles de récurrence	X			3	↘
	Robustesse des modèles de récurrence vis-à-vis du modèle de declustering, notamment pour R2/RB	X			3	?
	Discussion et accord sur M_{min}	X			2	↗ si M_{min} ↘
Mouvements du sol / GMPE	Composante verticale	X	X		2	?
	Utilisation de GMPE plus récentes (surtout subduction)	X	X		1	↘
	Résultats en "single-site sigma"	X	x		2	↘
Type de résultats	Sensibilité à la version logicielle	x			1	?
	Aléa moyen ou aléa médian ?	x			1	↘ si médian
	Spectres UHS ou spectres CM5(T ; T_{0i}) ?	x	x		1	↘
	Mode de sélection et d'ajustement spectral des accélérogrammes	x	x		1	?
Effets de site	Vérification des niveaux de déformation en cisaillement	X	x		1	? ↗
	Analyse de sensibilité des calculs de stabilité dynamique aux paramètres dynamiques des sols (y compris la possibilité d'effets particuliers de type "isolateur sismique")		x		2	? ↗ ↘
	Mesures complémentaires in-situ (PS logging, H/V bruit de fond, mesures en réseau)		x		2	?
	Instrumentation du site avec capteurs sismologiques			X	2	?

7 Réponse aux deux questions

7.1 Question 1 : *Quel est l'aléa sismique actuel de la région dans laquelle sont implantées les installations de l'Usine du Sud ?*

Les études mentionnées dans cette analyse comparative apportent un certain nombre d'éléments de réponse très robustes à cette première question, mais révèlent aussi certains défauts de connaissance ou ambiguïtés, qui empêchent d'y apporter une réponse unique et définitive. Tout d'abord il faut bien préciser les spécifications retenues pour la définition de l'aléa sismique, et ensuite on peut discuter les estimations actuelles du niveau de cet aléa, d'abord au niveau du rocher, ensuite en tenant compte des effets de site.

7.1.1 Définition de l'aléa sismique

Il importe d'abord de signaler plusieurs points relatifs à la définition de l'aléa à prendre en compte pour le dimensionnement des ouvrages, qu'il serait nécessaire de clarifier car les niveaux associés peuvent être sensiblement différents.

- Outre les périodes de retour à prendre en compte pour les OBE et SEE, il existe plusieurs possibilités de définir un aléa de référence (spectres "UHS" moyen ou médian, spectres "CMS" calés sur certaines périodes spectrales représentatives), et il serait utile pour éviter toute ambiguïté dans les discussions que des décisions soient prises sur la nature exacte des spectres à considérer, en concertation entre les différentes parties prenantes et en accord avec les recommandations des différents référentiels techniques.
- D'un autre côté, la dimensionnalité des mouvements à considérer (à savoir, composante horizontale uniquement - comme cela est considéré dans toutes les études analysées-, ou bien composantes horizontales ET verticale), doit également faire l'objet d'une décision informée, en raison de son impact potentiel sur les études de stabilité. A ce sujet, le référentiel technique "ANCOLD2019" s'avère plus exigeant, notamment pour les analyses dynamiques temporelles, que les référentiels "français" (CT44 AFPS 2021, rapport DGPR 2014).
- Compte tenu de la sensibilité des estimations d'aléa à la valeur de M_{min} , il serait utile de préciser la valeur à considérer (5 comme dans les études mentionnées ici, suivant les recommandations ANCOLD2019 pour les barrages, ou bien 4.5 comme indiqué dans le CT44 AFPS).
- Le dernier point important concerne la nature de la variabilité aléatoire à considérer pour les GMPE : variabilité totale σ_T (option retenue dans les études actuelles) ou variabilité réduite σ_{SS} ("single-site sigma"). Ce choix a des conséquences sur l'aléa régional au rocher (réduction quand on passe de σ_T à σ_{SS}), mais aussi sur la façon de prendre en compte les modulations liées aux conditions de site, qui doivent, dans le second cas, inclure de façon explicite les incertitudes sur les paramètres dynamiques dans les calculs de réponse du site (et de l'ouvrage).

7.1.2 Niveau de l'aléa sismique au rocher de référence

Toutes les études analysées s'accordent sur le fait que l'aléa sismique "au rocher de référence" dans le Sud de Grande Terre est contrôlé essentiellement par deux types de sismicité : du fait de la conjonction entre distance (≥ 200 km) et activité / taille des événements, la zone de subduction des Vanuatu contrôle l'aléa aux basses fréquences (en dessous de $f = 2-3$ Hz), tandis que l'aléa vibratoire à haute fréquence ($f \geq 3-4$ Hz) est contrôlé par la sismicité locale. Il en résulte les deux éléments de réponse suivants, assez contrastés :

- Comme la subduction est très active, avec de nombreux événements suffisamment forts pour être bien identifiés et localisés par les réseaux de surveillance mondiale, les taux de sismicité et la géométrie de la subduction y sont relativement bien contraints. C'est donc surtout le choix des "GMPE" de subduction qui va contrôler au premier ordre ces estimations d'aléa aux périodes spectrales intermédiaires et longues ($T \geq 0.3$ s). Il est probable que l'utilisation des GMPE "subduction" les plus récentes comme celles considérées dans JPS2021 donne des ordres de grandeur similaires mais légèrement inférieurs à ceux des études BRGM, et cela mériterait une vérification.
- A l'inverse, l'absence de synthèse récente sur les caractéristiques de la sismicité locale dans le Sud de Grande Terre, qui exploite de façon optimale les efforts entrepris ces 2-3 dernières décennies pour installer et maintenir un réseau local, se traduit par une beaucoup plus grande incertitude dans les estimations d'aléa à courte période spectrale ($T \leq 0.3$ s). On peut raisonnablement penser

que l'aléa courte période est compris entre les estimations fournies par les études BRGM2015, BRGM2021, JPS2021 et Chin et al. (2022, soumis, version révisée), qui sont relativement similaires (PGA autour de 0.1 g à 500 ans, et de 0.25 à 0.3 g à 10000 ans), et les estimations plus élevées obtenues par SRC2014, qui indiquent des valeurs de PGA autour de 0.15 g à 500 ans et de 0.5 g à 10000 ans (et similaires à ceux d'une version antérieure de l'article Chin et al., 2022). La révision à la baisse des niveaux donnés par Chin et al. (2022) suggère que ces dernières valeurs sont sans doute surestimées, mais cela demanderait à être étayé par une étude prenant mieux en compte toute la connaissance sur la sismicité locale. Cela dit, compte tenu de la hauteur et de la masse de l'ouvrage, il est probable qu'il soit plus sensible aux sollicitations à basse fréquence, contrôlées par la sismicité lointaine, qu'aux sollicitations haute fréquence associées à la sismicité locale.

7.1.3 Conditions de site et effets associés

Les nombreuses reconnaissances géotechniques et géophysiques conduites sur le site de l'ouvrage KO2 (et son voisinage immédiat, KO4 par exemple), ainsi que les calculs de réponse sismique, indiquent que l'aléa régional au rocher de référence peut être fortement modulé par les formations géologiques en place sous l'ouvrage, et ce sur une large plage de périodes spectrales (au moins de 0 à 1 s). La nature et l'ampleur de ces modulations gagneraient à être individualisées dans un document spécifique, plutôt que d'être mentionnées seulement "au passage" dans les calculs de stabilité de la berme (ce qui n'enlève rien à la pertinence de ces derniers), en incluant notamment une analyse de sensibilité aux paramètres des formations superficielles (linéaires et non-linéaires). La composante linéaire élastique de ces modulations gagnerait aussi à être confrontée à des mesures directes sur site au travers d'une instrumentation sismologique dédiée. Une telle instrumentation permettrait aussi à terme (en quelques années) un meilleur ajustement des GMPE utilisées pour les estimations d'aléa. On peut noter à ce sujet que les intérêts de l'instrumentation sismique in-situ sont clairement mis en avant dans les référentiels techniques "français" (Rapport 2014 "Risque sismique et sécurité des ouvrages hydrauliques" pour la DGPR, CT44 de l'AFPS) ; l'arrêté du 6 août 2018 impose même une telle instrumentation pour les ouvrages de classe A, nouveaux ou reconstruits, dans les zones de sismicité 4 et 5. En revanche, le document ANCOLD2019 est beaucoup plus prudent à ce sujet (dernier item du commentaire C2.1.3.4 p.53).

7.2 Question 2 : Dans le futur, peut-on s'attendre à une augmentation de l'intensité sismique ressentie en Nouvelle-Calédonie et spécifiquement dans le Grand Sud, à quelle échéance ?

Cette question peut être interprétée de deux façons différentes : l'aléa "ressenti" peut-il augmenter, en lien soit avec des "forçages" extérieurs (changement climatique, activités anthropiques) ou des évolutions démographiques et/ou urbanistiques, ou bien l'évolution des connaissances sur l'aléa sismique peut-elle amener à une augmentation de son estimation ?

Là encore, les études analysées dans ce rapport apportent certains éléments de réponse, mais qui restent partiels.

Estimation : l'aléa estimé est-il susceptible ou non de changer (à la hausse) ?

- Comme indiqué dans le paragraphe précédent, la réponse est plutôt "non" pour le contenu longue période, et "peut-être" pour le contenu courte période, tant que la sismicité locale n'aura pas été prise en compte avec une attention plus spécifique.

Forçages extérieurs : est-il possible que l'aléa soit "physiquement" modifié par des forçages extérieurs ?

- Aucune des études analysées n'aborde cette problématique, et donc les éléments de réponse à cette interprétation de la question n°2 doivent être recherchés ailleurs.
- Le seul élément spécifique rapportant un événement apparemment déclenché se trouve dans l'article Chin et al. (2022), soumis récemment pour publication dans un journal scientifique, qui mentionne un séisme local de magnitude légèrement inférieure à 4 quelques minutes (entre 10 et 15) après un séisme majeur de subduction ($M_w = 7.5$) aux Vanuatu : de tels événements ne sont détectables que sur des réseaux locaux, car leurs signaux sont "noyés" dans la coda des signaux du choc initial enregistrés à longue distance sur les réseaux mondiaux. Il serait nécessaire de vérifier dans les enregistrements disponibles sur les stations sismologiques du Sud de Grande-Terre si l'on peut documenter d'autres cas similaires, car cela pourrait modifier sensiblement les statistiques sur la sismicité locale.

- Les "forçages" éventuels sur la sismicité liés au changement climatique sont très peu documentés au niveau mondial. Certains ont mis en relation des essais de sismicité (généralement modérée) en lien avec de fortes précipitations et des phénomènes d'infiltration et de "lubrification" de plans de faille. L'éventualité de tels forçages dans le Sud de Grande-Terre nécessite des études spécifiques avec un réseau local suffisamment dense pour permettre un suivi de la microsismicité en éventuelle corrélation avec les relevés météorologiques.
- Les autres types de forçage connus sont liés aux modifications de conditions hydrauliques liées aux réservoirs de grande hauteur d'eau, aux activités conduisant à des modifications de pression de fluide en profondeur, soit par extraction de gaz ou d'hydrocarbures, soit par injection à forte pression (fracturation hydraulique, géothermie). Si de tels ouvrages ou projets existent, il est indispensable de suivre l'éventuelle sismicité induite par des réseaux locaux denses.

"Ressenti" et évolutions démographiques ou urbanistiques

- Le "ressenti" de la population peut évoluer si les conditions d'habitat évoluent. Par exemple, un accroissement des immeubles de grande hauteur (bureaux ou résidentiel) peut introduire une plus grande perception des mouvements basse fréquence liées à la sismicité forte et lointaine (subduction), sans cependant changer le niveau des intensités sismiques dont l'estimation est censée corriger des conditions de perception. Par ailleurs, des développements urbains sur des sols de qualité médiocre (comme les sols latéritiques à faible V_s) augmenteraient la sensibilité des résidents à tous les séismes, qu'ils soient lointains ou proches, en raison des phénomènes d'amplification dans de tels sols.

La meilleure façon de se donner les moyens de répondre aux différents aspects de cette question, est de s'assurer d'un suivi suffisamment fin de la sismicité locale, via un réseau suffisamment dense (et densifié dans les zones faisant l'objet de projets particuliers), et l'allocation des ressources humaines et techniques correspondantes.

8 References

- Abrahamson NA, Keuhn N, Gülerce Z, *et al.* (2018) Update of the BC Hydro Subduction Ground-Motion Model using the NGA-Subduction Dataset. PEER Technical Report 2018/02.
- Abrahamson, N. and Silva, W. (2008). Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground-motion relations. *Earthquake Spectra* 24, 67-97.
- Abrahamson, N., Gregor, N. & Addo, K., 2016. BC Hydro ground motion prediction equations for subduction earthquakes, *Earthq. Spectra*, 32(1), 23-44.
- AFPS, 2021. Guide pour la conception des cahiers des charges relatifs aux études d'aléa sismique en cohérence avec l'arrêté du 15/02/2018 applicable aux ICPE. Cahier Technique n° 44, Version n° 2 - Mai 2021, 110 pages. Available at <http://www.afps-seisme.org/PUBLI/>.
- Aitchison, J., Clarke, G., Meffre, S., Cluzel, D., 1995. Eocene arc-continent collision in New Caledonia and implications for regional southwest Pacific tectonic evolution. *Geology*, 23, 161-164.
- Akkar, S., Sandikkaya, M. A., Şenyurt, M., Sisi, A. A., Ay, B. Ö., Traversa, P., ... & Godey, S. (2014). Reference database for seismic ground-motion in Europe (RESORCE). *Bulletin of earthquake engineering*, 12(1), 311-339.
- Allen, T.I., Marano, K., Earle, P.S. and Wald, D.J. (2009). PAGER-CAT : A composite earthquake catalog for calibrating global fatality models. *Seism. Res. Lett.* 80, 57-62.
- ANCOLD 2019 - Guidelines For Design Of Dams And Appurtenant Structures For Earthquake (July 2019) - ISBN 978-0-9875022-6-1, 146 pages.
- Atkinson, G.M. & Boore, D.M., 2003. Empirical ground-motion relations for subduction-zone earthquakes and their application to Cascadia and other regions, *Bull. seism. Soc. Am*, 93(4), 1703-1729.
- Ballu, V., Gravelle, M., Wöppelmann, G., de Viron, O., Rebischung, P., Becker, M., & Sakic, P. (2019). Vertical land motion in the Southwest and Central Pacific from available GNSS solutions and implications for relative sea levels. *Geophysical Journal International*, 218(3), 1537-1551.
- Bertil D., Auclair S., Rey J. (2015) - Probabilistic Seismic Hazard Assessment for KO2 and KO4 dams in Goro (New Caledonia). BRGM/RC-64881-FR, 142 p., 43 fig., 34 tab., 3 appendixes.
- Bertil D., Lemoine A., Rey J., Auclair S., Dominique P., avec la collaboration de Winter Th. (2008) - Évaluation probabiliste de l'aléa sismique de la Nouvelle-Calédonie. Rapport BRGM/RP-54935-FR, 137 p., 81 fig., 13 tabl., 4 ann.
- Boore, D.M. & Atkinson, G.M., 2008. Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s, *Earthq. Spectra*, 24(1), 99-138.
- Boudghene-Stambouli, A., P.-Y. Bard, E. Chaljub, P. Moczo, J. Kristek, S. Stripajova, C. Durand, D. Zendagui and B. Derras, 2018. 2D/1D Aggravation Factors : From A Comprehensive Parameter Study To Simple Estimates With A Neural Network Model. 16ECEE (16th European Conference on Earthquake Engineering), Thessaloniki, Greece, June 18-21, 2018, paper #624, 12 pages.
- Bozorgnia, Y., Abrahamson, N. A., Atik, L. A., Ancheta, T. D., Atkinson, G. M., Baker, J. W., ... & Youngs, R. (2014). NGA-West2 research project. *Earthquake Spectra*, 30(3), 973-987.
- Cabioc'h, G. 1988. Recifs frangeants de Nouvelle Calédonie (Pacifique Sud Ouest), structure interne et influences de l'eustatisme et de la néotectonique. Thèse, Université de Provence - ORSTOM.
- Cabioc'h, G., Recy, J., Jouannic, C. and Turpin, L. 1996. Contrôle climatique et tectonique de l'édification récifale en Nouvelle- Calédonie au cours du Quaternaire terminal. *Bulletin de la Societe Geologique de France*, 167, 729-742.
- Calmant, S., Pelletier, B., Lebellegard, P., Bevis, M., Taylor, F. W., & Phillips, D. A. (2003). New insights on the tectonics along the New Hebrides subduction zone based on GPS results. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 108(B6).
- Campbell, K.W. and Bozorgnia, Y. (2008). NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10.0 s. *Earthquake Spectra* 24, 139-171.
- Chardon, D., & Chevillotte, V. (2006). Morphotectonic evolution of the New Caledonia ridge (Pacific Southwest) from post-obduction tectonosedimentary record. *Tectonophysics*, 420(3-4), 473-491.
- Chavez-Garcia FJ, Faccioli E (2000) Complex site effects and building codes : making the leap. *J Seismol* 4 :23-40.
- Chin, S-J, Sutherland, R. Savage, M.K., Townend, J., Collot, J., Pelletier, B., Monge, O. & Illsley-Kemp, F. (2022). Earthquakes and seismic hazard in southern New Caledonia, southwest Pacific, submitted to *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, February 2022.
- Chiou, B.S.-J. & Youngs, R.R., 2008. An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra, *Earthq. Spectra*, 24, 173-215.
- Collot, J., Geli, L., Lafoy, Y., Vially, R., Cluzel, D., Klingelhoefer, F., & Nouzé, H. (2008). Tectonic history of northern New Caledonia Basin from deep offshore seismic reflection : Relation to late Eocene obduction in New Caledonia, southwest Pacific. *Tectonics*, 27(6).

- Collot, J., Patriat, M., Etienne, S., Rouillard, P., Soetaert, F., Juan, C., ... & Privat, A. (2017). Deepwater Fold-and-Thrust Belt Along New Caledonia's Western Margin : Relation to Post-obduction Vertical Motions. *Tectonics*, 36(10), 2108-2122. <https://doi.org/10.1002/2017TC004542>.
- Collot, J., Patriat, M., Sutherland, R., Williams, S., Cluzel, D., Seton, M., Pelletier, B., Roest, W. R. Etienne, S., Bordenave, A. & Maurizot, P. (2020). Geodynamics of the SW Pacific : a brief review and relations with New Caledonian geology. *Geological Society, London, Memoirs*, 51(1), 13-26. In Maurizot, P. and Mortimer, N. (eds) 2020. *New Caledonia Geology, Geodynamic Evolution and Mineral Resources*. Geological Society, London, Memoirs, 51, 13-26, <https://doi.org/10.1144/M51-2018-5>.
- Crouse C. (1991) - Ground-Motion Attenuation Equations for Earthquakes on the Cascadia Subduction Zone. *Earthquake Spectra* 7(2), p. 201-236.
- Di Giacomo D., I. Bondar, D.M. Storchak, E. R. Engdahl, P. Bormann, J. Harris (2014) - ISC-GEM : Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900-2009), III. Re-computed MS and mb, proxy MW, final magnitude composition and completeness assessment. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pepi.2014.06.005>.
- Dimas, V-A & Cuthbertson, R. (2014) / SRC2014 - VNC-K04-FEL3 tailings dam, New Caledonia. Seismic Hazard Assessment & Time History Analysis. Seismology Research Center, 141 Palmer Street, Richmond, Vic3121 Australia. 67 pages.
- Douglas J (2018a) Capturing geographically-varying uncertainty in earthquake ground motion models or what we think we know may change. In : Pitilakis K (ed) Recent advances in earthquake engineering in Europe : 16th European conference on earthquake Engineering-Thessaloniki 2018, vol 46, pp. 153-181. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, vol 46, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75741-4_6.
- Douglas J (2018b) Calibrating the backbone approach for the development of earthquake ground motion models. In : Best practices in physics-based fault rupture models for seismic hazard assessment of nuclear installations : issues and challenges towards full seismic risk analysis, Cadarache-Chateau, France, 14-16 May 2018, 11 pages.
- Douglas, J. (2021), Ground motion prediction equations 1964 2021, <http://www.gmpe.org.uk>.
- Douglas, J., Akkar, S., Ameri, G., Bard, P. Y., Bindi, D., Bommer, J. J., ... & Traversa, P. (2014). Comparisons among the five ground-motion models developed using RESORCE for the prediction of response spectral accelerations due to earthquakes in Europe and the Middle East. *Bulletin of earthquake engineering*, 12(1), 341-358.
- Dubois, J., Launay, J. and Recy, J. 1974. Uplift movements in New Caledonia-Loyalty Islands area and their plate tectonics interpretation. *Tectonophysics*, 24, 133-150, [https://doi.org/10.016/0040-1951\(74\)90134-6](https://doi.org/10.016/0040-1951(74)90134-6).
- Engdahl, E.R., and Villaseñor, A., 2002, Global seismicity--1900-1999, chap. 41 of Lee, W.H.K., Kanamori, H., Jennings, P.C., and Kisslinger, C., eds., *International handbook of earthquake and engineering seismology*, Part A Amsterdam, Academic Press, p. 665-690.
- Engdahl, E.R., van der Hilst, R., and Buland, R. (1998). Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination. *Bull. Seism. Soc. Am.* 88, 722-743.
- Gardner, J., & Knopoff, L., (1974). Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 64(5) :1363-1367.
- Gregor, N., Abrahamson, N. A., Atkinson, G. M., Boore, D. M., Bozorgnia, Y., Campbell, K. W., ... & Youngs, R. (2014). Comparison of NGA-West2 GMPEs. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1179-1197.
- Grünthal G. (1985) - The up-dated earthquake catalogue for the German Democratic Republic and adjacent areas - statistical data characteristics and conclusions for hazard assessment. Proc. 3rd Int. Symp. On the Analysis of Seismicity and Seismic Risk. Liblice Castle, Czechoslovakia.
- Gueguen, P., Langlais, M., Foray, P., Rousseau, C. & Maury, J. 2011. A natural seismic isolating system : The buried mangrove effects. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101, 1073-1080.
- Hale, C., Abrahamson, N., & Bozorgnia, Y. (2018). *Report, Vol. 3*.
- Hoste Colomer R. & D. Bertil (2021) - Mise à jour de l'étude d'aléa sismique local du site de l'usine du Sud de Prony Resources NC en Nouvelle-Calédonie. Rapport final V2. BRGM/RC-71199-FR, 42 pages.
- Johnson, K. L., Pagani, M., & Styron, R. H. (2021). PSHA of the southern Pacific Islands. *Geophysical Journal International*, 224(3), 2149-2172.
- Kaklamanos, J., Bradley, B. A., Thompson, E. M., & Baise, L. G. (2013). Critical parameters affecting bias and variability in site-response analyses using KiK-net downhole array data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(3), 1733-1749. <https://doi.org/10.1785/0120120166>.
- Kotha S -R, Weatherill G, Cotton F (2020) A regionally adaptable ground-motion model for shallow crustal earthquakes in Europe. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 18 :4091 - 4125.
- Lagabrielle, Y., & Chauvet, A. (2008). The role of extensional tectonics in shaping Cenozoic New-Caledonia. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 179(3), 315-329.
- Lagabrielle, Y., Maurizot, P. et al. 2005. Post-Eocene extensional tectonics in southern New Caledonia (SW Pacific) : insights from on shore fault analysis and offshore seismic data. *Tectonophysics*, 403, 1-28, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.02.014>.

- Lamarre M., Hareesh C. Shah (1988) - Seismic hazard evaluation for sites in California development of an expert system. The John A. Blume Earthquake Engineering Center - Department of Civil Engineering Stanford University - Report No 85, 180 pages.
- Launay, J. (1985). Paléoniveaux marins et néotectonique à l'île des Pins (Nouvelle Calédonie). *Géologie de la France*, 1, 77-81.
- Launay, J. and Récy, J. 1972. Variations relatives du niveau de la mer et néotectonique en Nouvelle-Calédonie au Pléistocène supérieur et à l'Oligocène. *Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique*, XIV, 47-66.
- Leissi-Chemariou, A., I. Tromains & P.-Y. Bard, 2019. The use of horizontal to vertical spectral ratios for the identification of more complex site effect. 7ICEGE (7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering), Rome, Italy, June 17-20, 2019, 8 pages.
- Louat R. (1977) - Rapport sur la sismicité locale dans le sud de la Nouvelle-Calédonie. Notes techniques de l'ORSTOM.
- Louat R., Baldassari C. (1989) - Chronologie des séismes et des tsunamis ressentis dans la région Vanuatu Nouvelle-Calédonie (1729-1989). Rapports Scientifiques et Techniques. Sciences de la Terre. Géophysique. n°1 ORSTOM, Nouméa, 48 pages.
- Lussou, P., P. Bard, F. Cotton, and Y. Fukushima (2001). Seismic design regulation codes : Contribution of K-NET data to site effect evaluation, *J. Earthq. Eng.* 5, no. 1, 13-33.
- Matthews, K.J., Williams, S.E., Whittaker, J.M., Müller, R.D., Seton, M. and Clarke, G.L. (2015). Geologic and kinematic constraints on Late Cretaceous to mid Eocene plate boundaries in the southwest Pacific. *Earth-Science Reviews*, 140, 72-107, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.10.008>.
- Maurizot, P., Cluzel, D., Patriat, M., Collot, J., Iseppi, M., Lesimple, S., Secchiari, A., Bosch, D., Montanini, A., Macera, P., 2020a. The Eocene subduction-obduction complex of New Caledonia. *Geological Society, London, Memoirs*, 51, 93-130.
- Moczo, P., J. Kristek, P.-Y. Bard, S. Stripajová, F. Hollender, Z. Chovanová, M. Kristeková, D. Sicilia (2018). Key structural parameters affecting earthquake ground motion in 2D and 3D sedimentary structures, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16 (6), 2421-2450, <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0345-5>.
- Musson, R. (1999). Probabilistic seismic hazard maps for the North Balkan region, *Ann. Geofis.* 42, no. 6, 1109-1124.
- Paris, J.P., 1981. *Géologie de la Nouvelle-Calédonie, Un essai de synthèse*. Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, 113.
- Patriat, M., Collot, J., Danyushevsky, L., Fabre, M., Meffre, S., Falloon, T., ... & Fournier, M. (2015). Propagation of back-arc extension into the arc lithosphere in the southern New Hebrides volcanic arc. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16(9), 3142-3159.
- Patriat, M., Collot, J., Etienne, S., Poli, S., Clerc, C., Mortimer, N., ... & VESPA scientific voyage team (2018). New Caledonia obducted Peridotite Nappe : offshore extent and implications for obduction and postobduction processes. *Tectonics*, 37(4), 1077-1096.
- Perron, V., Gélis, C., Froment, B., Hollender, F., Bard, P. Y., Cultrera, G., & Cushing, E. M. (2018). Can broad-band earthquake site responses be predicted by the ambient noise spectral ratio? Insight from observations at two sedimentary basins. *Geophysical Journal International*, 215(2), 1442-1454.
- Perron, V., Hollender, F., Bard, P. Y., Gélis, C., Guyonnet-Benaize, C., Hernandez, B., & Ktenidou, O. J. (2017). Robustness of kappa (κ) measurement in low-to-moderate seismicity areas : Insight from a site-specific study in Provence, France. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(5), 2272-2292.
- Petersen, M.D., Harmsen, S.C., Rukstales, K.S., Mueller, C.S., McNamara, D.E., Luco, N. & Walling, M., 2012. Seismic Hazard of American Samoa and Neighboring South Pacific Islands-methods, Data, Parameters, and Results, US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Pillet, R., & Pelletier, B. (2004). Tectonique active, tsunamis et sismicité en Nouvelle-Calédonie. Notes Techniques, Sciences de la Terre, Géologie-Géophysique, IRD Noumea, 28, 19.
- Rahpeyma, S., Halldorsson, B., Olivera, C., Green, R. A. & Jónsson, S. 2016. Detailed site effect estimation in the presence of strong velocity reversals within a small-aperture strong-motion array in Iceland. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 89, 136-151.
- Reasenber, P.A. (1985) Second-order moment of central California seismicity. *J Geophys Res* 90 :5479-5495.
- REF : H354600- 1000-220-230-2001_A1 [4]. KO2 Dry Stack Design Report (Hatch, 2020) : Réf. : H354600- 1000-220-230-2001_A1.
- REF 017 1783848 Rev 0 [1]. Dynamic deformation analysis of the KO2 berm using the design parameters developed in 2016 (Golder, 2018). Réf. : 017 1783848 Rev 0.
- REF 41-27708-000-CI-RPT-000020 - Rev A [5]. VNC KO4 - KO2 BERM PRELIMINARY SEISMIC ASSESSMENT (GHD, September 2015) : Réf 41-27708-000-CI-RPT-000020 - Rev A.
- REF MC-18-146-VNC-03-R06 [3]. In-pit codisposal-Work package 4 : Geotechnics-Analyse des résultats des essais complémentaires (Mecater, 2019) : Réf. : MC-18-146-VNC-03-R06.
- REF MC-20-197-VAL-04-R02-F - Etude de design détaillé du confortement de la berme KO2 - Analyse de la stabilité de la berme KO2 et dimensionnement de la butée de pied - Rapport MECATER Ingénierie, 23/12/2020, 45 pages + annexes.

- REF MC-21-301-PRNC-01-R104 - Etude de design de la verse Lucy 2.0 - Justifications géotechniques du projet de construction de la verse Lucy 2.0 - FEL 3 - Rapport MECATER Ingénierie, 12/11/2021, 50 pages + annexes.
- REF MC-21-301-PRNC-01-R103. Etude de la verse LUCY 2.0 FEL3 - Rapport de modélisation géologique. Rapport Mecater Ingénierie, 45 pages, Février 2022.
- REF 1781012-009-R-Rev1 [2]. Factual report-KO2 Geotechnical Investigation (Geos4d, 2018) : Réf. : 1781012-009-R-Rev1.
- Régnier, M., Van de Beuque, S., Baldassari, C. and Tribot Laspiere, G. 1999. La sismicité du Sud de la Nouvelle-Calédonie : implications structurales. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Series IIA, Earth and Planetary Science, 329, 143-148, [https://doi.org/10.1016/S1251-8050\(99\)80216-X](https://doi.org/10.1016/S1251-8050(99)80216-X).
- Riga E, Makra K, and Pitilakis K (2016). Aggravation factors for seismic response of sedimentary basins : a codeoriented parametric study. *Soil Dyn Earthq Eng* 91 :116-132.
- Risque sismique et sécurité des ouvrages hydrauliques (2014). Rapport du groupe de travail "Barrages et Séismes" mis en place par le MEDDE (Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie) / DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques). 316 pages, Octobre 2014, <http://www.barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/gtbarragesseismes2014.pdf> (rédacteurs : Loudière, D., M. Hoonakker, P. Le Delliou, P.-Y Bard, B. Barthélémy, E. Bourdarot, G. Castanier, P. Cochet, P. Dominique, J.-J. Fry, H. Kobayashi, P. Lignier, M. Lino, S. Mercklé, A. Pecker, M. Poupart, D. Puech, J. Rey, P. Royet, P. Sabourault et B. Touileb).
- Rodriguez-Marek, A., F. Cotton, N.A. Abrahamson, S. Akkar, L. Al Atik, B. Edwards, G.A. Montalva, and H.M. Dawood. "A Model for Single-station Standard Deviation Using Data from Various Tectonic Regions." *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 103, Issue 6. pp. 3,149-3,163. 2013.
- Rodriguez-Marek, A., G.A. Montalva, F. Cotton, and F. Bonilla. "Analysis of Single-station Standard Deviation Using the KiK-net Data." *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 101, No. 3. pp. 1,242-1,258. 2011.
- Rodriguez-Marek, A., Rathje, E.M., Bommer, J.J., Scherbaum, , and Stafford, P.J., 2014. Application of single-station sigma and site response characterization in a probabilistic seismic hazard analysis for a new nuclear site : *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 104(4), p. 1601-1619.
- Rodriguez-Marek, A., E. Rathje, J. Ake, C. Munson, S. Stovall, T. Weaver, K. Ulmer, & M. Juckett (2021). Documentation report for SSHAC level 2 : site response, Research Information Letter #RIL2021-15, prepared for Participatory Peer Review Panel and U.S. Nuclear Regulatory Commission, 219 pages.
- Rong, Y., Park, J., Duggan, D., Mahdyar, M. & Bazzurro, P., 2012. Probabilistic seismic hazard assessment for south Pacific Island Countries, paper # 2521, in *Proceedings of 15th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE15)*, Lisbon, Portugal, 24-28 September 2012.
- Sadigh K., Chang C.-Y., Egan J.A., Makdisi F., Youngs R.R. (1997) - Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data. *Seismol. Res. Letters*, 68(1), p. 180-189.
- Schellart, W.P., Lister, G.S. and Toy, V.G. 2006. A Late Cretaceous and Cenozoic reconstruction of the southwest Pacific region : tectonics controlled by subduction and slab rollback processes. *Earth Science Reviews*, 76, 191-233, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.01.002>.
- Sevin, B., Maurizot, P., Cluzel, D., Tournadour, E., Etienne, S., Folcher, N., Jeanpert, J., Collot, J., Iseppi, M., Meffre, S. & Patriat, M. (2020). Post-obduction evolution of New Caledonia. *Geological Society, London, Memoirs*, 51(1), 147-188.
- Suckale, J. & Grünthal, G., 2009. Probabilistic seismic hazard model for Vanuatu, *Bull. seism. Soc. Am*, 99(4), 2108-2126.
- Takahashi, T., S. Kobayashi, Y. Fukushima, J. Zhao, H. Nakamura, and P. Somerville (2000). A spectral attenuation model for Japan using strong-motion data base, in *Proc. of the 6th International Conf. on Seismic Zonation*.
- Tournadour, E., Jorry, S. J., Etienne, S., Collot, J., Patriat, M., BouDagher-Fadel, M. K., ... & Maurizot, P. (2021). Neogene to Quaternary evolution of carbonate and mixed carbonate-siliciclastic systems along New Caledonia's eastern margin (SW Pacific). *Marine Geology*, 438, 106524.
- Uhrhammer R. (1986). Characteristics of Northern and Central California Seismicity. *Earthquake Notes*, 57(1), 21.9.
- Weatherill G, Kotha S -R, Cotton F. (2020) A regionally adaptable "scaled backbone" ground motion logic tree for shallow seismicity in Europe : application to the 2020 European seismic hazard model. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 18 : 5087 - 5117.
- Weichert, D. H. (1980). Estimation of the earthquake recurrence parameters for unequal observation periods for different magnitudes, *Bull. Seismol. Soc. Am*. 70, no. 4, 1337-1346.
- Youngs R.R., Chiou S.-J., Silva W.J., Humphrey J.R. (1997) - Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes. *Seismol. Res. Letters*, 68(1), p. 58-73.
- Zhao, J.X., et al., 2006. Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period, *Bull. seism. Soc. Am*, 96, 898-913.

9 Liste des acronymes utilisés

AFPS : Association Française de Génie Parasismique (FR)

ANCOLD : Australian National Committee on Large Dams (AU)

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières (FR)

CMS : "Conditional mean spectrum" ou spectre conditionné à une période spectrale particulière d'un spectre d'aléa uniforme destiné à fournir une représentation des sources sismiques contribuant à l'accélération du spectre d'aléa uniforme à la période spectrale d'intérêt. Les spectres CMS sont utilisés pour définir des accélérogrammes plus adaptés aux sources contrôlant l'aléa dans une gamme de période spectrale donnée que ceux définis pour ajuster un spectre d'aléa uniforme.

DGPR : Direction Générale à la Prévention des Risques

DIMENC : Direction de l'Industrie, des Mines et de l'Energie de la Nouvelle Calédonie

GMPE : Ground Motion Prediction Equation

ICOLD : International Commission on Large Dams

OBE : "Operating Basis Earthquake"

PGA : "Peak Ground accélération", ou accélération maximale du sol lors d'un événement sismique, qui est aussi mathématiquement égal au spectre de réponse en accélération à période nulle.

PSHA : Probabilistic Seismic Hazard Assessment

SEE : "Safety Evaluation Earthquake"

UHS : "Uniform Hazard Spectrum" (spectre d'aléa uniforme, c'est-à-dire spectre de réponse résultant de l'évaluation probabiliste de l'aléa sismique, pour lequel toutes les accélérations spectrales ont la même probabilité annuelle d'être atteintes ou dépassées. Ce spectre ne correspond généralement pas à un événement réel, mais à une combinaison d'événements de magnitudes différentes et situés à des distances différentes. Le spectre d'aléa uniforme est enveloppe d'un ensemble de spectres CMS couvrant les périodes spectrales d'intérêt en génie parasismique.

USGS : United States Geological Survey (organisme fédéral, USA)