

**ANALYSE DES ESTIMATIONS D’ALEA SISMIQUE
SUR LE SITE KO2
RESUME EXECUTIF**

Pierre-Yves Bard

Pour PRONY Resources

08/09/2022

1 Résumé exécutif

1.1 Objectifs

L'objectif de cette expertise est de donner un avis sur les estimations d'aléa sismique au site KO2 (Grande Terre, Nouvelle-Calédonie) telles que fournies dans les deux rapports BRGM 2015 et 2021, en vue de répondre à 2 questions :

- 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 ?"

1.2 Méthodologie et références

1.2.1 Méthodologie

Une estimation d'aléa sismique 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 a comporté 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 les études 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 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), ainsi qu'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

La seconde partie synthétique a consisté à coupler les enseignements de cette partie analytique fouillée avec une analyse comparative des résultats de différentes études d'aléa disponibles, pour identifier les éléments explicatifs pour les différences parfois significatives, et donc les points critiques et/ou questions en suspens susceptibles de nécessiter des approfondissements, ayant un impact majeur sur les estimations d'aléa, et affectant donc la réponse aux questions posées.

1.2.2 Références consultées

1.2.2.1 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 K02 de 2015 et 2021 (Bertil et al., 2015 ; Hoste-Colomer & Bertil, 2021), ce rapport a aussi considéré d'autres études d'aléa concernant soit un autre ouvrage situé lui aussi dans le Sud de Grande-Terre (Dimas & Cuthbertson, 2014 ou "SRC2014"), soit des zones plus étendues du Sud-Ouest Pacifique, dont une donnant une estimation pour Nouméa (Johnson et al., 2021, ou "JPS2021"), et d'autres (Suckale & Grünthal, 2009, ou "SG2009" ; Rong et al., 2012 ou "Rea2012" ; Petersen et al., 2012 ou "USGS2012") se focalisant sur les archipels plus sismiques situés soit plus à l'Est (Vanuatu, Samoa, Fidji), soit plus au Nord-Ouest (Papouasie Nouvelle Guinée, Solomon, etc.).

1.2.2.2 Sismicité et tectonique locale

Le présent rapport s'est aussi appuyé sur des échanges (mail et visio-conférence) avec des scientifiques locaux connaissant bien le contexte géodynamique, sismo-tectonique et sismologique local : O. Monge et J. Collot (Service Géologique de N^{elle}-Calédonie), M. Patriat (Ifremer) et R. Sutherland (Université de Wellington, NZ), responsable d'une campagne sismologique temporaire effectuée récemment dans le Sud de Grande-Terre.

1.2.2.3 Conditions de site et effets associés

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.

1.2.2.4 Référentiels techniques

Les référentiels ayant permis de cadrer tant l'analyse des études existantes que les recommandations finales sont d'une part le bulletin n°48 du Comité International pour les Grands Barrages (ICOLD 2014), et le document "Risque sismique et sécurité des ouvrages hydrauliques" (Octobre 2014) présentant un cadre général sur l'estimation des mouvements sismiques pour le dimensionnement des barrages en France, et d'autre part des guides plus techniques et plus récents donnant beaucoup de précisions sur les modalités pratiques pour cette estimation (CT 44 de l'AFPS, publié en 2021, donnant la pratique "française", et ANCOLD2019, publié en 2019, présentant les recommandations australiennes)

1.3 Analyse du modèle de source BRGM

L'élaboration d'un "modèle de source" comporte la constitution d'un catalogue de sismicité aussi homogène et complet que possible, la prise en compte des connaissances géologiques et géophysiques pour identifier et délimiter les différentes zones sources affectant le site considéré, et l'utilisation du catalogue de sismicité pour y quantifier les taux de récurrence par tranche de magnitude, ainsi que les événements maximaux possibles. Chacun de ces points est passé en revue et discuté, notamment au travers d'une analyse comparative entre les différentes études disponibles.

1.3.1 Contexte sismotectonique

D'un point de vue structural, la Nouvelle-Calédonie n'est plus une limite de plaque active depuis la mise en place par obduction d'une nappe d'ophiolites à la fin de l'Éocène (-34 Ma). Ces nappes d'ophiolites couvrent tout le sud de la Grande Terre, surmontant des roches sédimentaires plus anciennes datant du Crétacé supérieur au Paléogène (-98 à -55 Ma), et un socle datant du Paléozoïque supérieur au Mésozoïque. Les nappes et le socle ont ensuite été affectés par des failles normales ou décrochantes à forte inclinaison, attribuées à des processus isostatiques post-obduction.

La géodynamique régionale actuelle est dominée par les zones de subduction très actives situées à l'Est (Vanuatu-Loyauté, Fidji-Tonga), à même de générer de très fortes magnitudes (> 8). Néanmoins, leur distance au site (supérieure à 200 km) limite l'impact de cette sismicité aux mouvements basse à moyenne fréquence.

Le contexte plus local du Grand-Sud de la Nouvelle Calédonie intègre deux processus distincts :

- Une influence "à distance" de la subduction des Vanuatu, via l'interaction avec 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.
- Une tectonique spécifique associée au rebond isostatique après la phase d'obduction, 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. Les mouvements verticaux cumulés associés à ce rebond sont significatifs (de l'ordre de 1 km) ; la question de leur continuation à l'ère actuelle est ouverte, mais les données géodésiques récentes indiquent des mouvements verticaux non négligeables (jusqu'à quelques cm /an sur les marges de Grande Terre).

La sismicité de Grande-Terre et de ses environs immédiats ont fait l'objet de plusieurs études spécifiques au cours des dernières décennies, grâce à des réseaux permanents ou temporaires. 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.

1.3.2 Catalogue de sismicité

L'absence de catalogue "officiel" de référence couplant les sismicités historique et instrumentale conduit chaque étude d'aléa sur la région à reprendre les informations existantes dans différentes bases de données en libre accès, et à en faire la synthèse avec une certaine variabilité d'une étude à l'autre. La plupart des études considérées, dont celles du BRGM, s'appuient soit exclusivement soit essentiellement sur les bases de données mondiales (ISC, ISC-GEM, USGS, GCMT-Harvard, etc.) et très peu sur les données locales issues des réseaux régionaux, en raison de la faible durée de fonctionnement de ces derniers (quelques décennies au mieux), et du faible niveau de la sismicité locale : seule l'étude BRGM2015 mentionne la prise en compte du catalogue régional établi à partir du réseau local IRD, qui comprend plusieurs milliers de séismes de magnitude < 4, mais qui n'ont finalement pas été exploités dans l'estimation des taux de récurrence en raison de la difficulté d'estimer les périodes de complétude du fait des changements fréquents de configuration du réseau.

1.3.2.1 Homogénéisation en magnitude de moment M_w

L'hétérogénéité des estimations de magnitude dans les catalogues d'origine (magnitudes d'ondes de volume m_b , d'ondes de surface M_s , de moment M_w) conduit chaque étude à adopter des relations de conversion en magnitude de moment M_w . Ces relations peuvent assez notablement différer d'une étude à l'autre, avec des écarts approchant 1 pour les magnitudes modérées (m_b-M_w) et pour les fortes magnitudes (M_s-M_w). Cela introduit une incertitude significative sur les magnitudes des catalogues utilisés, incertitudes 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).

1.3.3 Zones source

Les études d'aléa probabilistes peuvent faire appel à différents types de "découpage en zones sources" : *aires surfaciques / volumiques*, *failles* caractérisées par leur localisation, orientation, pendage, taux et type d'activité. 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 : de tels modèles ne sont considérés dans aucune des études analysées, compte tenu de la faible étendue temporelle du catalogue de sismicité, surtout pour la sismicité locale modérée. Dans la plupart des études (dont celles du BRGM), seuls les premiers types de source (aires surfaciques / volumiques) ont été utilisés.

Les contours de ces aires ou failles sont délimités à partir de l'ensemble des connaissances géologiques, géophysiques, et sismiques, et varient d'une étude à l'autre. Les études du BRGM de 2015 et 2021 ont considéré 2 alternatives, le zonage du BRGM2008, et celui de l'étude SRC2014. Tous deux diffèrent dans le détail mais ont deux caractéristiques communes

- 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, une zone extrêmement étendue, 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 connue et localisée pour les événements modérés.

Cela constitue à mon avis un sujet de discussion important pour chacune des études (BRGM et SRC2014), car 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 à des zones de dimensions plus réduites autour du site, ou a minima à justifier le choix de zones de grande extension.

1.3.4 Modèles de récurrence : traitement préalable

Ces modèles établissent, pour chacune des zones (ou failles), les taux annuels de récurrence en fonction de la magnitude de l'événement. Leur établissement nécessite un prétraitement du catalogue ("declustering" ou élimination des répliques et éventuellement précurseurs, et détermination des périodes de complétude), ainsi que la détermination d'une borne supérieure de magnitude pour chacune des zones source.

- **Declustering** : L'objectif est de "filtrer" le catalogue brut initial pour ne garder que les chocs principaux à occurrence (quasi-) poissonnienne, en considérant un fenêtrage spatio-temporel pour éliminer les répliques et les éventuels précurseurs. L'algorithme utilisé à cette fin dans les études BRGM est un algorithme "classique" avec des paramètres spatio-temporels adaptés, mais les études paramétriques montrent une grande sensibilité du catalogue "declustered" à ces paramètres spatio-temporels, et les incertitudes associées à ce choix ne sont pas clairement explicitées.
- **Complétude** : l'objectif est d'identifier sur quelle période temporelle le catalogue peut être considéré comme complet, c'est-à-dire avec une sismicité régulière dans le temps. Cette période est d'autant plus courte que le seuil de magnitude inférieur est plus faible. Dans l'idéal, ces périodes de complétude devraient être déterminées zone source par zone source, mais cela n'a pas été possible dans le cas présent en raison du trop faible nombre de séismes dans certaines d'entre elles. Les études d'aléa du BRGM n'ont pu analyser la complétude que sur l'ensemble du périmètre considéré autour du site KO2, soit un rectangle d'environ 400 km autour du site. La plupart des études analysées s'accorde à considérer une période de complétude depuis le début des années 1960 pour les magnitudes supérieures à 5 à 5.5, et le début du XXème siècle pour les magnitudes supérieures à 7-7.5. Aucune étude ne donne 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.
- **Magnitude maximale** : les failles ayant une longueur finie, variable d'une zone source à l'autre, la pratique actuelle est de borner la distribution des magnitudes à une valeur maximale "Mmax", dont l'estimation peut reposer sur différentes approches, et comporte des incertitudes qui peuvent être prises en compte au travers d'une distribution de valeurs. Les études BRGM pour le site KO2 ont estimé M_{max} en appliquant un incrément à la magnitude maximale observée dans chaque zone, et en ne considérant qu'une seule valeur scalaire plutôt qu'une distribution comme l'ont fait certaines des autres études d'aléa considérées ici. L'analyse comparative montre que les valeurs retenues par le BRGM pour M_{max} dans la zone locale sont dans la fourchette basse des valeurs considérées dans les 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.

1.3.5 Modèles de récurrence : résultats finaux

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

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

Où la valeur b est généralement proche de 1. L'ajustement des paramètres $\lambda(M_0)$ et β ou b au catalogue de sismicité prétraité est effectué, autant que possible pour chaque zone, de façon statistique en utilisant le maximum de vraisemblance (Weichert, 1980).

Un des paramètres les plus critiques pour l'aléa à longue période de retour est la valeur de la pente b dans les zones qui contrôlent l'aléa sismique, à savoir la zone locale à haute fréquence, et la zone de subduction Vanuatu-Loyauté à fréquence basse et intermédiaire.

- La comparaison avec les autres études disponibles indique une valeur de b anormalement forte (de 1.35 à 1.55) pour la zone qui inclut le site KO2, 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. Une des raisons de ces fortes différences 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, devrait cependant permettre de mieux contraindre le paramètre b , surtout si l'on individualise une zone d'extension plus réduite. Cette option a été considérée dans une étude récente (Chin et al., 2022, soumise à publication, en révision), et conduit de fait à des valeurs de b plus proches de 1.
- Pour les zones de subduction, qui contrôlent l'aléa à basse fréquence, on observe de bien moins grandes différences d'une étude à l'autre, avec des valeurs de b plus proches de 1, et de surcroît bien mieux contraintes par la sismicité beaucoup plus forte.

1.3.6 Traitement des incertitudes

Les études BRGM prennent en compte les incertitudes sur le modèle de source de façon très classique via un arbre logique (une branche pour chaque zonage sismotectonique), et des tirages aléatoires sur la profondeur des événements (h), ainsi que sur les paramètres $\lambda(5)$ et B de la loi de récurrence dans chaque zone-source. Un tel traitement est très classique, il peut cependant 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} . 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}).

1.4 Analyse du modèle de mouvements du sol

1.4.1 Type de mouvements (H - V)

Les mouvements sismiques réels ont 3 composantes en translation, deux horizontales $H1$ et $H2$, et une verticale V . 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 constituer un manque 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.

Les caractéristiques (amplitude et spectre) de la composante verticale sont différentes de celles des composantes horizontales : si l'on admet assez souvent, par commodité, un rapport de 2/3 entre le spectre V et le spectre H ($=H1=H2$), 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.

1.4.2 Sélection des GMPE (mouvements horizontaux)

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). Comme il en existe plusieurs centaines, plus ou moins complexes, ajustées sur des jeux de données différents, correspondant à différents types de sismicité (crustale peu profonde, subduction, ...), et avec différentes techniques de régression, la sélection des GMPE à utiliser est une étape délicate, 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), ou même leur ajustement (ce qui est le cas pour Grande Terre).

Dans le cas présent, ce choix a été fait en privilégiant les GMPE récentes les mieux reconnues à la date des études dans la communauté scientifique. Cette reconnaissance évolue cependant rapidement, et les choix seraient sans doute différents en 2022 de ce qu'ils ont été en 2015 (et maintenus en 2021). La comparaison des différentes études d'aléa sur la région indique cependant une assez bonne convergence de choix, hormis pour la plus récente (JPS2021).

- Pour la sismicité crustale superficielle hors subduction, ce sont les relations "NGA2008" établies à partir d'un jeu de données à dominance ouest-américaine qui apparaissent les plus utilisées dans les études de la dernière décennie. Il est cependant surprenant que les plus récentes études (JPS2021, BRGM2021) n'aient pas pris en compte la version plus récente de cette famille (NGA-2, 2014), ou

celle établie sur un principe similaire sur un jeu de données pan-européen (RESORCE, 2014, 2020). 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), le choix est plus restreint et ce sont surtout celles les mieux reconnues dans les années 90 et 2000 qui ont été utilisées. Un certain nombre d'auteurs s'accordent cependant sur leur tendance à la surestimation à forte magnitude, et recommandent l'utilisation d'une GMPE plus récente (2016/2018) qui a de fait été prise en compte dans l'étude JPS2021 mais pas dans la mise à jour BRGM2021.

1.4.3 Prise en compte des incertitudes épistémiques

La pratique la plus répandue pour pallier la variabilité d'une GMPE à l'autre est d'en considérer plusieurs avec des pondérations éventuellement non uniformes, pour essayer de capturer au mieux la médiane et la dispersion des mouvements possibles, dispersion d'autant plus grande que les données locales sont peu nombreuses. C'est cette approche en arbre logique qui a été retenue dans les études BRGM, avec 3 GMPE "sismicité crustale" et 2 GMPE "subduction", avec des poids égaux dans chaque cas (soit 1/3 et 1/2), en l'absence d'éléments objectifs pour en préférer certaines au détriment des autres. Elle est 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 souhaitable que la mise à jour de 2021 intègre des mises à jour des GMPE sélectionnées en 2015, voire de nouvelles établies à partir de jeux de données autres et/ou plus étendus.

1.4.4 Prise en compte des incertitudes aléatoires

Ces incertitudes aléatoires correspondent à la dispersion interne ("écart-type" σ) des GMPE considérées, quantifiées à partir de l'écart entre les jeux de données initiaux et les prédictions moyennes. Leur prise en compte et la valeur de σ affecte considérablement les estimations d'aléa, notamment à longue période de retour. Les études BRGM (comme les autres considérées pour l'analyse comparative) ont suivi la pratique usuelle jusqu'à il y a une quinzaine d'années, à savoir considérer l'écart-type "brut" ou "total" σ .

Néanmoins l'analyse de cette variabilité aléatoire a connu de très importants développements depuis 15-20 ans, partant du constat qu'elle pouvait être décomposée en plusieurs composantes, dont au moins une peut être ignorée lorsqu'on évalue l'aléa en un site donné, conduisant à une variabilité "site-unique" ("single-site", dénotée σ_{SS}) légèrement réduite par rapport à σ , et conduisant donc à une certaine réduction de l'aléa estimé, surtout à longue période de retour. Il convient cependant de signaler que cette option n'est possible que si l'incertitude épistémique (càd liée au manque de connaissance) sur les effets modificateurs associés aux conditions de site est correctement prise en compte. Dans les documents que j'ai pu consulter avant le printemps 2022, ces effets de site sont actuellement considérés de façon implicite dans l'analyse de stabilité de la digue, mais sans prise en compte explicite des incertitudes sur les caractéristiques géotechniques des sols d'assise sous l'ouvrage.

1.5 Conditions de site et effets de site

Ce point 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. Néanmoins, les informations sur la géologie du site et les caractéristiques géotechniques et géophysiques des sols d'assise, disponibles dans différents rapports liés à l'analyse de la stabilité mécanique de l'ouvrage, indiquent qu'ils sont susceptibles de modifier très notablement les mouvements sismiques sollicitant la base de l'ouvrage. Comme indiqué à la fin du paragraphe précédent, l'individualisation de ces effets de site pourrait permettre une réduction de la variabilité aléatoire et donc de l'aléa de référence.

1.5.1 Conditions de site sous l'ouvrage

Le substratum de péridotite correspondant au "rocher de référence" où est estimé l'aléa sismique à prendre en compte se situe à très faible profondeur sur les crêtes autour de l'ouvrage, mais 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. Le modèle géologue 3D établi sur la base de nombreux forages et reconnaissances géophysiques montre que non seulement l'épaisseur totale de ces différentes formations de surface est très variable spatialement, mais aussi leur épaisseur individuelle.

Les caractéristiques mécaniques (notamment la rigidité en cisaillement) de ces sols superficiels, sont sensiblement plus faibles que celles du substratum. Il en résulte des phénomènes, parfois complexes,

d'amplification et/ou de réduction des mouvements sismiques, dépendant du niveau d'excitation et de la fréquence considérée. Ces phénomènes peuvent de plus varier spatialement le long de l'ouvrage, en raison des variations d'épaisseur des différentes formations.

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). 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 forage ("cross-hole" CH ou "down-hole" DH), parfois complétées par quelques mesures en laboratoire. Les vitesses les plus faibles correspondent aux mesures CH dans les sols latéritiques en place, la "zone de transition" et la couche fine de saprolite terreuse, et peuvent descendre en-dessous de 200 m/s (jusqu'à 160 m/s mesuré) à la base des sols latéritiques.

1.5.2 Effets potentiels associés

Si l'on se base sur ces valeurs, il apparaît que les fréquences de résonance probables du sol d'assise et de l'ouvrage sont assez proches (autour de 1 Hz), et qu'il existe probablement une interaction forte entre la réponse sismique du sol de fondation et celle de l'ouvrage. Cette interaction est d'ailleurs au moins partiellement prise en compte dans les calculs de stabilité qui intègrent l'empilement complet sol + ouvrage depuis le substratum de péridotites peu altérées.

Plusieurs facteurs peuvent affecter cette interaction et sont discutés : i) incertitude sur les valeurs de Vs, ii) variations latérales du sous-sol (effets 2D ou 3D), iii) comportement non-linéaire et incertitudes associées (paramètres de non-linéarité, modèle rhéologique), et enfin iv) dans le cas du site KO2, des effets particuliers associés à la fine couche de saprolite terreuse, si elle a une rigidité sensiblement plus faible que les formations au-dessus (latérites) et en-dessous (saprolite rocheuse).

- Comme indiqué plus haut, la prise en compte des incertitudes (Vs, non-linéarité) serait nécessaire en cas d'utilisation d'une variabilité aléatoire réduite ("single-site sigma" σ_{SS}) pour l'aléa de référence au rocher. Elles ne semblent pas l'être de façon explicite à l'heure actuelle (printemps 2022).
- Par ailleurs, il semblerait que les vitesses prises en compte pour les formations les moins rigides dans certains calculs de stabilité soient légèrement supérieures (250 m/s) à celles mesurées, alors qu'elles étaient plus faibles (150 m/s) dans des calculs antérieurs, ainsi que dans d'autres calculs récents : il serait intéressant d'individualiser explicitement cette sensibilité aux valeurs de Vs dans les formations les moins rigides.
- Le comportement non-linéaire est pris en compte dans les calculs avec une approche linéaire-équivalente, très classique, mais dont la validité n'est reconnue que jusqu'à un certain seuil de déformation de cisaillement (0.5%). La valeur des déformations atteintes n'est pas indiquée dans les documents dont j'ai eu connaissance. Par ailleurs, même à l'intérieur de la plage de déformations admissibles, plusieurs publications récentes attirent l'attention sur une tendance à la sous-estimation des mouvements sismiques à haute fréquence avec cette approche.
- Dans les conditions indiquées, une fine couche de saprolite terreuse "pincée" entre des formations sensiblement plus rigides pourrait jouer le rôle d'un "isolateur sismique", amplifiant les basses fréquences et filtrant les hautes. Cet aspect particulier n'est pas évoqué et mériterait sans doute une analyse dédiée.

Des propositions sont enfin faites pour mieux quantifier ces différents effets, ou tester leur existence ou non, au moyen de mesures instrumentales abordables (mesures temporaires en bruit de fond, instrumentation permanente de l'ouvrage et du sol d'assise avec des capteurs sismologiques sensibles, mesures haute-résolution du profil de vitesse en forage avec des outils de type "suspension-logging").

1.6 Résultats

La dernière phase de l'analyse comparative concerne les estimations d'aléa au rocher de référence, exprimées sous différentes formes :

- courbes d'aléa pour le PGA et certaines valeurs spectrales $S_a(0.2s)$ et $S_a(1.0s)$,
- spectres d'aléa uniforme "UHS(T)", parfois en spectres conditionnés moyens "CMS(T ; T_i)",
- analyse de désagrégation pour identifier les scénarios dominants contrôlant l'aléa à une période spectrale donnée et une période de retour donnée,
- 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.

1.6.1 Courbes d'aléa, spectres et désagrégation

Seules quatre études permettent de comparer, partiellement, ces divers résultats d'aléa pour des sites situés au sud de Grande Terre : sites proches de KO2 et KO4 (BRGM2015-2021, SRC2014), Nouméa (JPS2021). Une cinquième étude, soumise pour publication (Chin et al., 2022), donne quelques résultats partiels (PGA seulement) pour Nouméa. Leur comparaison conduit aux observations principales présentées ci-dessous.

L'analyse des résultats indique une forte différenciation entre l'aléa à courte période spectrale ($T \leq 0.2-0.3$ s) et celui à plus longue période spectrale ($T \geq 0.3-0.5$ s)

- Le premier (courte période spectrale) est contrôlé essentiellement, surtout à longue période de retour (10000 ans, SEE) par la sismicité modérée locale, tandis que le second (longue période spectrale) est contrôlé exclusivement par la forte sismicité distante de subduction.
- En termes d'aléa moyen, les différentes estimations sont donc plus proches l'une de l'autre à longue période spectrale (1.0 s) qu'à courte période (PGA, 0.2 s). Cela provient d'analyses différentes sur les taux de récurrence de la sismicité locale, beaucoup moins bien connue. Il en résulte, à haute fréquence, de fortes différences entre les estimations BRGM et JPS2021 d'un côté, et celles obtenues dans SRC2014 indiquant un PGA autour de 0.16 g pour l'OBE, et autour de 0.5 g le SEE. Une autre étude récente (Chin et al., 2022, soumis, en révision) prend en compte une campagne de sismicité locale, et aboutit à des estimations comparables à celles du BRGM et JPS2021.
- Ces contributions différentes de la sismicité locale et distante conduisent également, compte tenu de la structure des arbres logiques utilisés, à des différences assez fortes, notamment à longue période, entre les UHS moyen et les UHS médians, jusqu'à 100% pour BRGM2021, c'est-à-dire bien au-delà des différences usuelles d'environ 10%. Cette disparité se retrouve dans l'écart entre les fractiles provenant des différentes branches de l'arbre logique, et la forme "à 2 pics" des spectres UHS F85 de l'étude BRGM 2021. Le rapport F85/F15 augmente avec la période spectrale et la période de retour.
- Cela induit aussi des très fortes différences entre les spectres d'aléa uniforme UHS(T) et les spectres conditionnés CMS(T, T₀) : ces derniers sont en effet beaucoup plus sensibles au scénario dominant à la période de contrôle T₀ retenue : une courte période de contrôle sélectionne les séismes locaux, une longue période de contrôle sélectionne les séismes lointains.
- On peut noter aussi la tendance de l'étude JPS2021 à indiquer des niveaux (un peu) plus faibles que les autres à longue période spectrale, ce qui est sans doute à relier avec l'utilisation de la GMPE "subduction" la plus récente et sans doute la mieux contrainte.

1.6.2 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 utilisée par le BRGM consiste alors à sélectionner un certain nombre d'accélérogrammes naturels correspondant aux scénarii (magnitude-distance) indiqués par l'analyse de désagrégation, et d'utiliser en procédure d'"ajustement" de ces signaux pour que leur spectre corresponde aux spectres de dimensionnement.

Dans les deux études BRGM2015 et 2021, le parti pris a été de considérer des scénarii à la fois « proches superficiels » et « lointain subduction », et d'ajuster chacun des accélérogrammes correspondants aux spectres cibles UHS retenus. Il existe une différence notable cependant quant au choix des spectres UHS cibles : les spectres médians dans l'étude BRGM2015, et les spectres moyens dans la mise à jour 2021, et ce pour les deux périodes de retour (OBE 500 ans et SEE 10000 ans). Il existe une autre différence entre les études BRGM2015 et 2021 : la première considère 8 accélérogrammes de base (7 pour un séisme modéré proche et 1 pour un séisme de subduction à distance intermédiaire de 75 km), et les ajuste successivement à chacun des spectres OBE et SEE ; la seconde considère un nombre d'accélérogrammes légèrement plus faible (6 au lieu de 8), mais différencie le choix des accélérogrammes suivant le niveau de dimensionnement (OBE ou SEE).

Ces choix appellent plusieurs remarques, sur les choix de scénarii comme sur le choix des spectres cibles

- i) La comparaison des scénarii retenus dans chaque cas aux résultats de désagrégation dans le plan (magnitude-distance) indique que d'une part la sélection BRGM2015 semble a priori plus pertinente pour les séismes locaux avec des magnitudes modérées entre 5 et 6.5 et des distances inférieures à 40-50 km (magnitudes plus fortes de 6.5 à 7.5 et distances intermédiaires de 50 à 120 km pour la sélection BRGM2021), et que d'autre part aucune des sélections ne considère d'enregistrement correspondant à une subduction lointaine (200 à 300 km, $M \geq 7.8$), ce qui conduit à des signaux

insuffisamment longs. Ces sélections semblent donc guidées par un impératif de "compromis" entre les deux types de scénario contrôlant l'aléa, qui peut être discuté.

- ii) La différenciation très nette entre contributions longue et courte période, jointe à la forme très particulière "à 2 pics" du spectre UHS incite par ailleurs fortement à séparer plus nettement les contributions des sources proches et lointaines dans les analyses dynamiques. Il semblerait légitime et physiquement justifié 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. Des suggestions pratiques sont données pour l'élaboration de ces spectres cibles en lien avec les spectres CMS.
- iii) Enfin, il est recommandé de clarifier avec les autorités de contrôle quel doit être le niveau cible : spectres moyen ou médian ?

1.6.3 Résumé des analyses de sensibilité (BRGM2015)

L'étude BRGM2015 est la seule à intégrer une analyse de sensibilité assez fouillée qui peut éclairer la compréhension des différences entre les niveaux d'aléa estimés par les différentes études consultées. Les résultats de ces analyses sont donc brièvement rappelés. Ils concernent les hypothèses faites sur certains paramètres du modèle de source (zonage, paramètres d'activité de la zone locale, magnitude minimale M_{\min} , magnitude maximale M_{\max}), et du modèle de mouvement du sol (GMPE). Les enseignements de ces études sont utiles pour la comparaison avec les autres études, et l'orientation des conclusions et recommandations finales.

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

Au terme de cette analyse, il apparaît que les études d'aléa effectuées par le BRGM en 2015 et 2021 sont conformes à la pratique usuelle des analyses PSHA. Comme pour toutes les études PSHA, certaines améliorations "à la marge" restent toujours possibles pour préciser certains aspects. Mais surtout, comme toutes les autres sur la Nouvelle Calédonie, elles souffrent cependant d'un handicap majeur provenant de l'absence d'une synthèse scientifique récente sur les caractéristiques de la sismicité locale : il en résulte une forte dispersion des différents résultats disponibles à haute fréquence pour le Sud de Grande-Terre. Les paragraphes suivants font la synthèse des points qui pourraient faire l'objet d'améliorations, avant de les rassembler dans un tableau avec des indications sur leur temporalité et une suggestion de hiérarchisation en ordre de priorité, pour répondre aux deux questions rappelées en introduction.

1.7.1 Modèles de source

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

Toutes les études indiquent que l'aléa à longue période de retour est contrôlé par la sismicité locale. Dans les estimations considérées (site-spécifique ou régionales), cette "sismicité locale" est associée à une zone de sismicité crustale de très grande extension spatiale, incluant des domaines terrestres et marins où la sismicité modérée est mal connue, et où les lois de récurrence sont donc mal contraintes et très variables d'une étude à l'autre. En parallèle, plusieurs arguments géodynamiques et sismo-tectoniques attribuent un comportement particulier à la zone sud de Grande-Terre, et les études actuelles fondées essentiellement sur des catalogues mondiaux sous-exploitent les données fournies par les réseaux locaux. L'individualisation dans au moins un modèle alternatif d'une zone source locale devrait permettre de mieux prendre en compte toutes les connaissances accumulées par les scientifiques locaux (Service géologique NC, IRD, et leur réseau de collaborateurs du Sud-Ouest Pacifique), notamment via l'intégration de milliers de séismes de magnitude inférieure à 4 pour mieux contrôler la pente "b" des modèles de récurrence.

1.7.1.2 Autres points susceptibles d'amélioration

- M_{\max}

La tendance actuelle des études PSHA est de considérer une distribution de valeurs de M_{\max} , plutôt qu'une seule valeur comme dans les études BRGM. Même si l'étude BRGM2015 indique une sensibilité modérée à M_{\max} même pour le SES, une telle option serait mieux en ligne avec les recommandations de certains guides techniques (CT44 AFPS).

- M_{\min}

Le choix $M_{w\min} = 5$ effectué dans la majorité des études considérées, est essentiellement un choix "par défaut" lié au manque de connaissances sur la sismicité modérée. Compte tenu des valeurs recommandées dans les guides techniques ($M_{w\min} = 4.5$ pour le CT44 AFPS, 4.5 à 5 pour ANCOLD2019), ce choix pourrait faire l'objet d'une discussion, au moins pour une zone locale d'extension réduite, avec les autorités et scientifiques locaux.

- Robustesse vis-à-vis des algorithmes de declustering

La très forte sensibilité du nombre d'événements finalement retenus dans le catalogue à l'algorithme retenu pour le declustering, incite à une étude de sensibilité des paramètres de récurrence (notamment la pente b de la relation Gutenberg-Richter) aux différentes options plausibles pour le declustering, dont les résultats pourraient ensuite conduire à l'introduction d'un branchement spécifique dans l'arbre logique, au moins pour la zone locale.

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

La façon dont les incertitudes sur les magnitudes et les localisations de chaque événement, et sur les paramètres d'activité λ et b sont propagées dans le calcul d'aléa, n'est pas clairement documentée. Des précisions et éventuellement des corrections seraient utiles pour être conformes aux recommandations du guide technique CT44 AFPS, en particulier sur la corrélation ou non des incertitudes sur λ et b .

1.7.2 Modèle de mouvements du sol

1.7.2.1 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 des préconisations spécifiques à ce sujet. Le premier recommande la prise en compte de la composante V dans les calculs dynamiques temporels de stabilité des ouvrages, le second la conditionne à une étude préalable de la sensibilité effective de l'ouvrage à la composante V ; de plus ce dernier considère comme acceptable l'utilisation d'un rapport V/H constant pour passer de H à V , alors que le premier recommande l'utilisation d'une équation de prédiction du type $V/H = f(M, \text{mécanisme}, R, \text{site})$. Il en résulte la recommandation 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 évalué simplement permettant de générer des accélérogrammes à 2 ou 3 composantes compatibles avec ces spectres H et V et le scénario dominant.

1.7.2.2 GMPE utilisées

Même si les GMPE utilisées dans les études BRGM2015 et 2021 sont assez cohérentes avec celles des 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 propositions sont faites dans ce sens.

1.7.2.3 Variabilité aléatoire

Dans la mesure où l'étude d'aléa est site-spécifique, il serait légitime 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 impliquerait cependant de bien individualiser l'effet spécifique du site de l'ouvrage, en considérant les incertitudes épistémiques associées.

1.7.3 Type de résultats

1.7.3.1 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.

1.7.3.2 Moyenne / médiane

La configuration particulière du site KO2, caractérisée par un aléa sismique "bimodal", conduit à des différences notables entre les UHS moyens et médians. Le choix de l'UHS moyen est plus conforme aux recommandations des guides techniques de référence (ANCOLD2019 p. 66, CT44 de l'AFPS). Comme il est

supérieur à l'UHS médian, c'est une décision assez lourde de conséquences, et il importe que ce choix soit décidé en concertation avec les autorités de contrôle. C'est le choix fait dans l'étude BRGM2021.

1.7.3.3 UHS / CMS et accélérogrammes synthétiques

Un autre sujet, peu abordé dans les études considérées, concerne le choix des types de spectres (UHS ou CMS) à considérer pour les accélérogrammes temporels. Le choix du BRGM de prendre les spectres UHS et d'y ajuster tous les accélérogrammes quel que soit le scénario (M, R), est le choix le plus courant, mais pas forcément le mieux adapté à la situation locale avec deux types de scénario très différents (proche modéré et lointain très fort). Le choix de plusieurs spectres CMS selon les préconisations ANCOL2019 paraîtrait mieux indiqué et moins conservatif : considérer plusieurs CMS ($T ; T_{0i}$) à diverses périodes T_{0i} , considérer les scénarii (M, R) associés par désagrégation, sélectionner des jeux d'accélérogrammes spécifiques à chacun de ces scénarii, et les ajuster au CMS ($T ; T_{0i}$) correspondant. L'augmentation du nombre d'analyses dynamiques serait compensée par le caractère plus réaliste et moins conservatif des signaux ainsi ajustés.

1.7.4 Conditions de site et effets associés

La prise en compte des effets des formations meubles sous l'ouvrage, d'une façon compatible avec l'utilisation du "single-site sigma" dans les GMPE, nécessiterait leur individualisation avec le calcul d'un aléa en surface du sol d'assise, en considérant plusieurs hypothèses plausibles pour les profils de vitesse et les courbes de dégradation (incertitudes épistémiques), ainsi que le calcul systématique des niveaux de déformation de cisaillement atteints dans les formations les plus meubles et leur comparaison aux seuils communément admis pour chaque approche non-linéaire. Je recommande également une attention particulière aux effets potentiellement très spécifiques de la formation très souple de saprolite terreuse, via des mesures complémentaires de profil de vitesse haute-résolution et des mesures de bruit de fond en surface.

Plus généralement, la calibration des GMPE et des modèles de réponse de site seraient grandement facilités par l'installation de capteurs sismologiques sensibles en divers endroits du site.

1.7.5 Liste récapitulative des recommandations sur le modèle d'aléa

Le Tableau I 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 termes / 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. Y est également indiquée en dernière colonne la conséquence probable sur le niveau de l'aléa (lorsque cela est possible): une flèche dirigée vers le haut correspond à une hausse, vers le bas à une baisse, un point d'interrogation à une impossibilité d'anticiper.

Tableau I : Liste récapitulative des améliorations possibles sur le modèle d'aléa, avec indications sur leur temporalité (court, moyen ou long terme), et 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	?

C'est sur la base de ces conclusions que sont formulées les réponses aux deux questions ayant motivé cette expertise. Le lecteur est renvoyé au dernier chapitre de ce rapport, déjà assez synthétique, car ces réponses ne sont pas binaires et leur exposé doit être nuancé.