



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité

IRSN
INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Fontenay-aux-Roses, le 28 mai 2021

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

AVIS IRSN N° 2021-00071

Objet : **Projet Cigéo - Approche déterministe pour la définition de l'aléa en phase d'exploitation et variations du mouvement sismique avec la profondeur**

Réf. : Lettre ASN CODEP-DRC-2020-009668 du 18 juin 2020

Par lettre citée en référence, vous sollicitez l'avis de l'IRSN sur les éléments transmis par l'Andra à l'ASN en 2019 relatifs i) à la justification de l'aléa sismique retenu pour le dimensionnement en phase d'exploitation des installations de surface et souterraine de Cigéo, ii) à la détermination de la variation du mouvement sismique en profondeur et iii) aux caractéristiques du spectre de dimensionnement. La transmission de ces éléments fait l'objet d'un engagement pris par l'Andra à l'issue de l'examen en 2017 du dossier d'options de sûreté (DOS) de Cigéo, en vue de la demande d'autorisation de création (DAC).

Vous demandez en particulier à l'IRSN d'examiner :

- les hypothèses retenues (zonages sismotectoniques et caractéristiques « magnitude-distance ») pour définir les séismes majorés de sécurité (SMS),
- la prise en compte des incertitudes inhérentes à la définition des caractéristiques des SMS et des spectres associés,
- la fonction de transfert utilisée pour évaluer le mouvement sismique en profondeur (notamment la représentativité des échantillons permettant de la reconstituer et la méthode statistique appliquée),
- sur la base de ces éléments, la robustesse du spectre minimal forfaitaire (SMF) retenu par l'Andra pour définir l'aléa sismique pendant la phase d'exploitation des installations de surface, d'une part, et de celles en profondeur, d'autre part,
- le caractère enveloppe du spectre de dimensionnement (SDD) au regard de l'évaluation de l'aléa sismique.

MEMBRE DE
ETSON

1 – Hypothèses retenues pour définir les SMS

La définition des SMS, en application de la règle fondamentale de sûreté (RFS) 2001-01 de l'ASN relative à la détermination du risque sismique sur les installations nucléaires de base de surface, nécessite de sélectionner des séismes de référence pour le site. Cette sélection repose sur l'utilisation d'un zonage sismotectonique et sur une estimation des caractéristiques des séismes historiques.

Dans le dossier transmis, l'Andra a réévalué, depuis le DOS de Cigéo, les caractéristiques de magnitude et de profondeur de la plupart des séismes de référence qu'elle retient pour le site. En particulier, l'Andra a réévalué à la hausse la magnitude du séisme de Clairvaux (Luxembourg) de 1733, qui est désormais considéré comme un des séismes de référence. En application de la RFS 2001-01, les spectres SMS associés aux différents séismes de référence (Bitche, Remiremont, Clairvaux notamment, cf. Figure 1 ci-dessous) étant couverts par le SMF (calé à 0,1 g à la fréquence infinie comme défini par la RFS 2001-01), l'Andra retient le SMF pour définir l'aléa sismique des installations de surface de Cigéo en phase d'exploitation.

Le zonage sismotectonique considéré par l'Andra n'appelle pas de remarque particulière de l'IRSN. Les caractéristiques des séismes de référence retenus appellent quant à elles les commentaires suivants. Au regard de la faible sismicité de cette région, l'évaluation de l'aléa ne peut s'appuyer que sur un nombre limité d'informations sur les séismes historiques. Les caractéristiques des séismes les moins bien connus sont en outre susceptibles d'être modifiées dans le futur avec l'évolution des connaissances. Aussi, l'IRSN estime que des caractéristiques conservatives doivent être retenues pour ces séismes afin d'établir un spectre SMS robuste dans le temps. Les nouvelles valeurs de magnitude et de profondeur assignées par l'Andra aux séismes de Bitche, Metz, Bligny, Wavignies, Remiremont et Bâle sont cohérentes avec les connaissances actualisées en géologie et en sismologie. En revanche, les caractéristiques retenues par l'Andra pour le séisme de Clairvaux de 1733 ne paraissent pas conservatives au regard du spectre SMS associé. En effet, la position épiscopentrale du séisme, et *in fine* son intensité épiscopentrale, sont sujettes à de fortes incertitudes, conduisant à des spectres SMS différents (cf. Figure 1). La position retenue par l'Andra, voisine de la localité de Flamierge (Belgique) où a été relevée une intensité VI, conduit à une intensité épiscopentrale de VI et à un spectre SMS en dessous du SMF. *A contrario*, la position épiscopentrale retenue dans SisFrance¹, établie à partir d'un travail d'analyse mené en commun par le BRGM, EDF et l'IRSN (cf. Figure 1), est plus éloignée de Flamierge et conduit à une intensité épiscopentrale supérieure à VI et à un spectre SMS dépassant le SMF. En outre, des données inédites sur ce séisme découvertes récemment par l'IRSN dans des archives historiques témoignent de chutes de cheminées dans le sud du Luxembourg et de la Belgique, faisant passer le nombre de localités ayant subi une intensité VI de une à trois. Compte tenu de leur espacement important, l'épicentre est vraisemblablement éloigné de ces localités de quelques dizaines de kilomètres. Cette information conforte l'hypothèse d'une localisation épiscopentrale différente de celle choisie par l'Andra et d'une intensité épiscopentrale supérieure à celle de VI retenue par l'Andra. Une telle révision des caractéristiques du séisme de Clairvaux pourrait remettre en cause l'enveloppe des spectres SMS retenue par l'Andra à ce jour.

Aussi, l'IRSN recommande que, dans le cadre de la DAC, l'Andra révise les caractéristiques qu'elle attribue au séisme de Clairvaux dans son application de la RFS 2001-01, en retenant notamment les caractéristiques épiscopentrales les plus conservatives telles qu'elles peuvent être déduites des connaissances disponibles, notamment nouvelles. Ce point fait l'objet de la recommandation R1 en annexe 1 au présent avis.

2- Incertitudes relatives à la définition des caractéristiques des SMS et de leurs spectres associés

Les sources d'incertitudes associées à un spectre SMS sont de diverses natures :

¹ Sisfrance : base de données de la sismicité historique de la France. <https://sisfrance.irsn.fr/>

- a) les séismes de référence et leurs caractéristiques - magnitude et profondeur - peuvent être modifiés par des données nouvelles telles que des descriptions inédites de dégâts liés aux séismes historiques (cf. ci-dessus pour le séisme de Clairvaux) ou la survenue de nouveaux séismes (par exemple le séisme du Teil survenu dans la région de Montélimar en novembre 2019, qui interroge sur la nécessité de réévaluer le SMS retenu pour les installations nucléaires environnantes),
- b) la définition des caractéristiques des SMS varie selon les choix effectués par les experts qui les évaluent (interprétation des observations macrosismiques, méthodes d'estimation des caractéristiques des séismes, délimitation des zonages sismotectoniques). Les spectres SMS alternatifs issus des différents choix d'expert peuvent varier significativement et ne sont pas systématiquement couverts par le spectre SMS retenu par l'exploitant, notamment lorsque les données sont peu nombreuses ou que divers modèles alternatifs coexistent,
- c) les accélérations spectrales des SMS dépendent des méthodes d'évaluation du mouvement sismique, qui ont connu une évolution notable depuis celle définie dans la RFS 2001-01 (e.g. équations récentes, type de magnitude considéré).

La première source d'incertitude précitée (point « a ») est illustrée dans la section 1 du présent avis par la découverte d'informations nouvelles sur le séisme de Clairvaux. L'IRSN développe ci-dessous son analyse de la prise en compte par l'Andra des incertitudes relatives à la définition des spectres SMS associés aux séismes de référence (cf. point « b » ci-dessus), puis des incertitudes sur les accélérations spectrales des SMS (point « c » ci-dessus).

Dans le DOS, l'Andra avait présenté une analyse d'incertitudes basée sur le calcul d'une distribution de spectres SMS plausibles prenant notamment en compte, pour plusieurs zonages alternatifs, les incertitudes sur la magnitude et la distance au foyer des séismes ainsi qu'une variation d'un écart-type autour des mouvements sismiques moyens calculés avec l'équation de prédiction du mouvement sismique (GMPE) définie dans la RFS 2001-01. L'IRSN avait alors considéré cette analyse pertinente. Il avait toutefois suggéré de la compléter en intégrant des catalogues de sismicité consolidés et d'autres zonages sismotectoniques. Ce point a fait l'objet de l'engagement précité de l'Andra.

Dans le dossier transmis, l'Andra a présenté une comparaison du spectre SMS retenu à une analyse d'incertitudes sur les spectres des séismes maximaux historiquement vraisemblables (SMHV), établis avec de nouveaux zonages et des caractéristiques de séismes actualisées. Or, l'évaluation de la robustesse du SMS retenu devrait se baser sur une comparaison à une distribution de spectres SMS plausibles, obtenus après majoration forfaitaire de 0,5 en magnitude des SMHV (RFS 2001-01). Le choix de l'Andra repose sur la démarche de vérification préconisée par la DGSNR en 2003, dans le cadre des réexamens de sûreté des réacteurs d'EDF en exploitation de 900 et 1300 MWe, consistant à s'assurer que les spectres SMS réévalués par l'exploitant sont suffisamment enveloppes des spectres SMHV établis sur la base d'autres hypothèses tout aussi cohérentes. À cet égard, l'IRSN souligne que le cadre du réexamen est différent de celui de la création d'une installation, de surcroît dans le cas d'un site nouveau et pour une installation dont la durée d'exploitation prévue est de l'ordre du siècle. L'IRSN considère donc que la robustesse du spectre SMS retenu par l'Andra pour Cigéo doit être évaluée en comparaison d'autres spectres SMS possibles issus de l'application de la RFS 2001-01 et non en comparaison de spectres SMHV, qui ne tiennent pas compte de la majoration forfaitaire mentionnée ci-avant.

A défaut d'éléments présentés par l'Andra en ce sens, l'IRSN a exploré différentes applications de la RFS 2001-01 afin d'analyser les incertitudes relatives à la définition des spectres SMS associés aux séismes de référence (cf. point « b » ci-dessus), en considérant plusieurs zonages et la variabilité des caractéristiques magnitude-profondeur associées aux séismes de référence issues de ses propres estimations. Cette étude, qui ne tient pas compte des nouvelles informations disponibles sur le séisme de Clairvaux trop récemment découvertes pour avoir été intégrées à la base de données SisFrance, conduit à définir une distribution statistique de spectres reflétant les incertitudes associées au SMS. Cette distribution est présentée sur la Figure 1. Selon cette étude, l'incertitude sur le niveau SMS est assez large et le SMF ne couvre que 50% des spectres SMS à partir de 3 Hz et

seulement 15% au-delà de 6 Hz. **La majorité des spectres SMS possibles est ainsi située au-dessus du SMF, qui ne peut donc être retenu comme spectre SMS de site pour la phase d'exploitation de Cigéo. L'engagement de l'Andra de réaliser, pour la DAC, une analyse d'incertitudes sur les caractéristiques des SMS reste donc d'actualité en vue d'établir le spectre SMS de site.**

S'agissant de l'incertitude sur les accélérations spectrales des SMS (point « c » ci-dessus), l'Andra avait présenté dans le DOS une étude qui prend en compte des GMPE plus récentes, paramétrées notamment en magnitude de moment au lieu de la magnitude d'ondes de surface mise en œuvre dans la RFS 2001-01. Cette étude conduit à des accélérations plus fortes que celles obtenues en application de la RFS 2001-01, en particulier à haute fréquence. L'IRSN avait considéré cette analyse pertinente, notamment parce qu'elle permet de tenir compte de l'évolution des connaissances depuis une vingtaine d'années en matière de prédiction du mouvement sismique. Dans le dossier transmis en 2019, l'Andra ne tient plus compte de cette analyse. **Pour établir le spectre SMS d'une installation nouvelle telle que Cigéo, l'IRSN considère que l'Andra devrait tenir compte de l'évolution de l'état de l'art relatif à la prédiction du mouvement sismique, celui-ci pouvant conduire à des spectres SMS plus forts que ceux obtenus par la RFS 2001-01, notamment pour les hautes fréquences.**

Concernant l'évaluation probabiliste de l'aléa sismique attendue dans le cadre de la DAC conformément à une demande de l'ASN, l'IRSN rappelle sa remarque exprimée à l'issue de son expertise du DOS selon laquelle les valeurs des paramètres (poids des hypothèses retenues, magnitudes maximales et minimales, catalogues, vitesses des failles, écart-type des GMPE, etc.) nécessiteront d'être justifiées. L'IRSN estime que le choix du spectre d'aléa devra résulter du croisement des approches probabiliste et déterministe afin de couvrir l'essentiel des incertitudes, dûment explorées quelle que soit l'approche.

3 - Caractère enveloppe du SMF et du SDD vis-à-vis de l'aléa en surface

Comme mentionné ci-avant, la prise en compte de caractéristiques conservatives pour le séisme de Clairvaux, d'une analyse d'incertitudes réalisée sur les spectres SMS ainsi que d'équations de prédiction du mouvement sismique plus récentes que celle utilisée dans la RFS 2001-01, pourrait conduire à des spectres SMS qui dépassent le SMF, notamment dans les hautes fréquences du spectre d'aléa. Ainsi, l'IRSN considère que le SMF n'est pas suffisamment enveloppe des spectres SMS du site Cigéo pour définir l'aléa sismique en surface en phase d'exploitation.

Le SDD retenu par l'Andra au stade du DOS (voir Figure 1) est un spectre présentant une accélération maximale du sol (PGA) à 0,13 g, établi sur la base d'une analyse probabiliste réalisée en phase d'avant-projet sommaire (Dossier 2005 Argile). Selon l'Andra, ce SDD étant enveloppe du SMF, il permet le dimensionnement des installations de surface. Or, l'analyse précitée des incertitudes sur les caractéristiques des SMS menée par l'IRSN montre que le SDD ne couvre que 50% des spectres SMS possibles à partir de 6 Hz (Figure 1). Cette estimation ne tient pas compte de la réévaluation à la hausse des accélérations spectrales qui pourraient être associées au SMS du séisme de Clairvaux, ni de celles associées à l'application d'équations de prédiction du mouvement sismique plus modernes, qu'il reviendra à l'Andra de prendre en compte. Ainsi, **l'IRSN estime que le SDD actuellement retenu par l'Andra n'est pas suffisamment enveloppe de l'aléa sismique.**

L'existence de sources d'incertitudes que l'on ne peut pas encore quantifier précisément justifie d'autant plus de prévoir des marges sur l'aléa en considérant pleinement les incertitudes quantifiables en l'état actuel des connaissances. **Aussi, l'IRSN recommande que l'Andra revienne, dans le cadre de la DAC, à l'approche qu'elle avait développée dans le DOS pour quantifier les incertitudes au niveau SMS, en tenant compte de l'état de l'art (séisme de Clairvaux, prédiction du mouvement sismique), afin de définir un spectre de dimensionnement de Cigéo en phase d'exploitation présentant suffisamment de provisions vis-à-vis des incertitudes relatives à la définition de l'aléa sismique.** Ce point fait l'objet de la recommandation R2 en annexe 1 au présent avis.

En outre, au vu du faible élancement et de la régularité structurelle des installations de surface présentées par l'Andra au stade du DOS, l'IRSN estime que la réévaluation du spectre de dimensionnement en vue de couvrir

l'aléa sismique de manière plus robuste ne devrait pas conduire à d'importantes difficultés d'adaptation de leur conception.

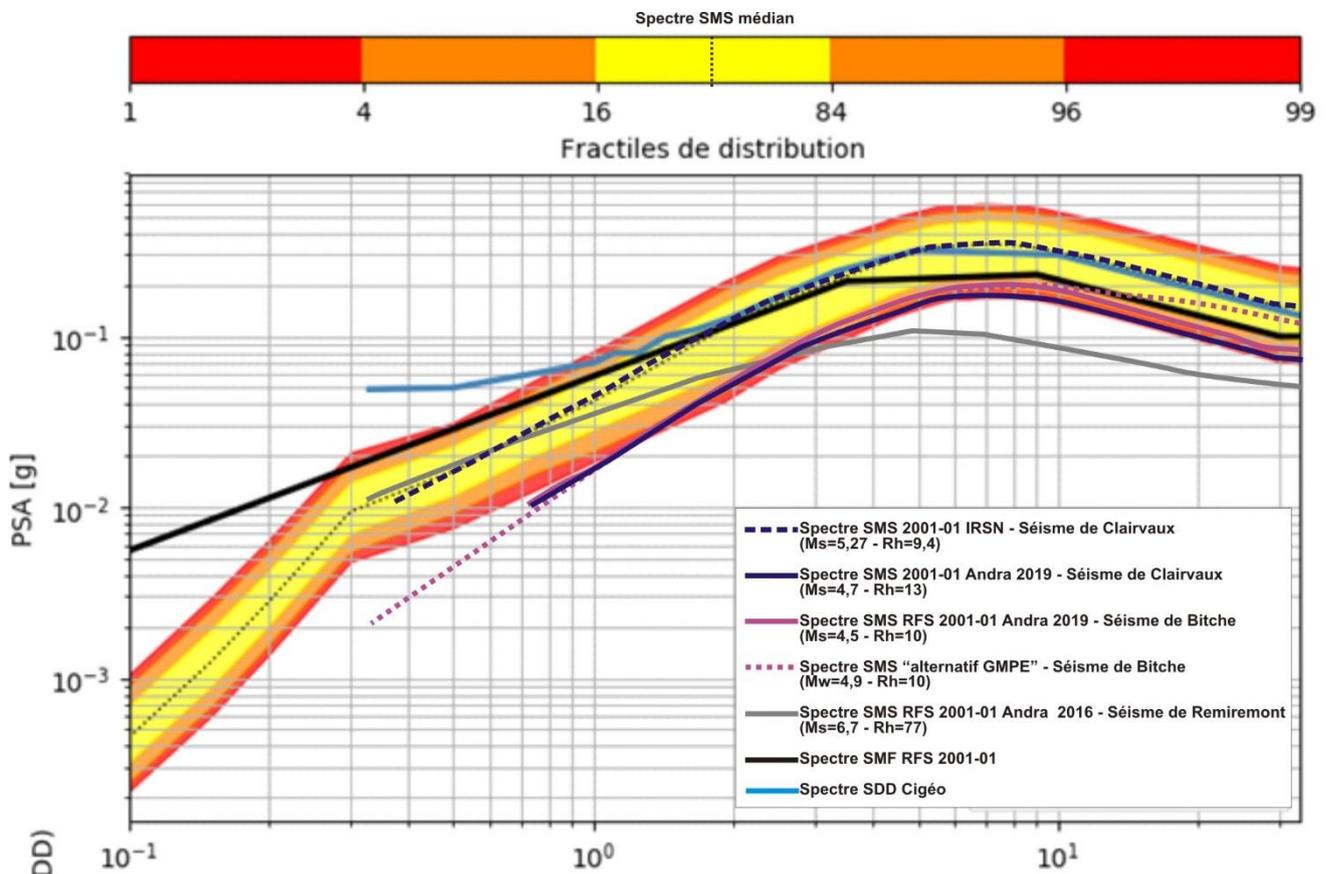


Figure 1 – Spectres SMS établis en application de la RFS 2001-01 pour le séisme de Clairvaux par l'Andra (bleu foncé continu) et par l'IRSN (bleu foncé tireté ; épicerie SisFrance), pour le séisme de Remiremont (gris continu) et de Bitche (rose continu) par l'Andra. Le spectre SMS de Bitche (rose pointillé) « alternatif GMPE » illustre l'impact d'une évolution future de la règle de calcul des spectres SMS en utilisant des magnitudes de moment et une sélection de GMPE utilisée dans les calculs probabilistes de l'Andra. Comparaison avec les spectres SMF de la RFS (en noir) et SDD de l'Andra (en bleu). En fond, distribution de spectres SMS possibles (en jaune, orange et rouge) établis par l'IRSN à partir de différents zonages (IRSN détaillé, GEOTER, EDF et BRGM) et de ses estimations des caractéristiques des séismes de référence.

4 - Fonctions de transfert et caractère enveloppe du SMF et du SDD vis-à-vis de l'aléa en profondeur

En vue d'établir des « fonctions de transfert du mouvement sismique », représentant le rapport entre le mouvement sismique en surface et celui en profondeur en fonction de la fréquence, l'Andra a sélectionné les vingt-sept séismes proches, régionaux ou lointains présentant les meilleurs rapports « signal-sur-bruit » parmi les enregistrements effectués depuis 2013 sur le site du laboratoire souterrain en surface et en profondeur (-490 m). Les fonctions calculées étant presque toujours supérieures à 1, l'Andra conclut que le spectre d'aléa est plus faible en profondeur qu'en surface et que, de manière prudente, le spectre d'aléa retenu pour les installations de surface peut être également retenu pour les installations en profondeur.

L'IRSN relève que le nombre d'événements exploitables pour chaque fréquence est assez faible (entre 10 et 15 séismes en moyenne). En particulier, la fonction de transfert est établie pour les hautes fréquences sur la base de cinq séismes proches de faible magnitude et présente une grande variabilité statistique autour de 1. Il est également constaté que quelques séismes montrent une légère amplification en profondeur (fonction de transfert inférieure à 1) à très basse fréquence et vers 7-8 Hz, mais le faible nombre d'évènements ne permet pas de statuer sur la fiabilité de ces mesures. La variabilité des mesures pour chaque fréquence ainsi que d'une fréquence à une autre peut résulter de différents phénomènes physiques (interaction entre l'onde sismique et la géologie locale) ou des méthodes mises en œuvre (mesures, physique des ondes, méthode d'analyse).

L'IRSN estime que les ouvrages de Cigéo situés aux profondeurs intermédiaires nécessitent une attention particulière du point de vue du risque sismique. En particulier, le toit des argiles du Callovo-Oxfordien (vers -410 m), destiné à recevoir les scellements des puits et de la descenderie, pourrait être le siège de comportements singuliers des ondes sismiques en raison du contraste mécanique avec les calcaires de l'Oxfordien. À cet égard, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction son intention de compléter à l'échéance de la DAC son étude de la variabilité de la fonction de transfert en fonction de la profondeur sur la base des enregistrements réalisés au laboratoire souterrain aux profondeurs intermédiaires (à 254 m et 445 m de profondeur). L'Andra a en outre précisé qu'elle prévoit d'implanter de nouvelles stations de mesures, à différentes profondeurs et en surface. L'IRSN considère, sur le principe, que l'installation d'un plus grand nombre de stations de mesure devrait permettre de caractériser les éventuelles variations spatiales des fonctions de transfert au sein de la couche hôte. L'acquisition de ces données, en complément de la poursuite des enregistrements prévue par l'Andra, pourra également lui permettre de produire une analyse plus approfondie, notamment des différences éventuelles de fonction de transfert entre séismes proches et lointains ou entre des mouvements sismiques faibles et ceux s'approchant des niveaux SMS, et ainsi d'identifier, le cas échéant, les types de séismes qui pourraient s'accompagner de mouvements plus forts en profondeur.

L'Andra a par ailleurs réalisé des simulations numériques à une dimension (1D) par différentes méthodes à partir d'un profil de vitesses déduit des reconnaissances géophysiques du sous-sol afin d'établir des fonctions de transfert et de les comparer à celles obtenues à partir des mesures de séismes. Les résultats de cette modélisation étant éloignés de ceux issus des mesures, l'Andra souhaite privilégier l'approche empirique par la suite et, comme indiqué ci-avant, étendre son réseau de mesures latéralement et verticalement. L'IRSN rappelle toutefois que la faible sismicité locale et régionale ne permettra pas avant des dizaines d'années d'obtenir suffisamment d'enregistrements pour que les fonctions de transfert qui en seront déduites représentent la variété des caractéristiques possibles (profondeur, distance, intensité...), variété qui peut être cependant simulée par la modélisation numérique. En outre, l'IRSN estime que les simulations présentées pourraient être améliorées à court terme, notamment par une prise en compte des variations fines du modèle de vitesse et de sa composante horizontale (2D), afin de disposer d'un outil de calcul des fonctions de transfert à l'échelle de toute l'installation souterraine. Les modélisations peuvent permettre en outre de pallier le manque de mesures directes sur l'intégralité du site du laboratoire souterrain ainsi que l'absence de mesures à l'emplacement prévu pour les installations de Cigéo. Elles peuvent enfin servir à tester des scénarios de mouvements sismiques équivalents aux SMS et à étudier la sensibilité des rapports spectraux à l'anisotropie du milieu (notamment au sein des couches argileuses).

Ainsi, bien que les mesures et les résultats préliminaires de la modélisation numérique présentés à ce stade semblent indiquer l'absence d'une forte amplification sismique en profondeur, **l'IRSN estime qu'il n'existe pas assez d'éléments à ce stade pour se prononcer sur le caractère conservatif de la fonction de transfert retenue par l'Andra et sur le spectre de dimensionnement qui en résulte pour l'ensemble de l'installation souterraine. Aussi, l'IRSN recommande que, dans le cadre de la DAC, l'Andra consolide les fonctions de transfert par fréquence et profondeur qu'elle retient, par exemple en s'appuyant sur davantage de stations de mesures en surface et en profondeur et en complétant les résultats obtenus par de la modélisation numérique.** Ce point fait l'objet de la recommandation R3 en annexe 1 au présent avis.

En matière d'impact sur le spectre de dimensionnement de Cigéo, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction que le dimensionnement des ouvrages souterrains de Cigéo est davantage imposé par les contraintes apportées par le massif rocheux à cette profondeur que par le spectre sismique retenu pour le dimensionnement, dont le niveau restera en tout état de cause relativement bas du fait de la faible sismicité régionale. Sur la base de ces éléments, l'IRSN estime qu'une réévaluation du SDD visant à couvrir les incertitudes restantes sur le mouvement sismique en profondeur est peu susceptible de remettre en cause les bases de conception des installations souterraines posées à ce stade du projet Cigéo.

5- Conclusion

L'IRSN considère que l'aléa sismique retenu par l'Andra pour la phase d'exploitation de Cigéo repose sur des hypothèses globalement cohérentes avec les données disponibles, mais qu'il ne couvre pas suffisamment les incertitudes existantes sur les différents composants du calcul (caractéristiques du séisme de Clairvaux, définition des SMS, méthodes d'évaluation du mouvement sismique, fonction de transfert du mouvement sismique en profondeur). Ces points font l'objet des recommandations en annexe.



Pour le Directeur général et par délégation,
François Besnus
Directeur de l'Environnement

ANNEXE 1 A L'AVIS IRSN N° 2021-00071 DU 28 MAI 2021

Recommandations de l'IRSN

Recommandation n° 1

L'IRSN recommande que, dans le cadre de la DAC, l'Andra révise les caractéristiques qu'elle attribue au séisme de Clairvaux dans son application de la RFS 2001-01, en retenant notamment les caractéristiques épicentrales les plus conservatives telles qu'elles peuvent être déduites des connaissances disponibles, notamment nouvelles.

Recommandation n° 2

L'IRSN recommande que l'Andra revienne, dans le cadre de la DAC, à l'approche qu'elle avait développée dans le DOS pour quantifier les incertitudes au niveau SMS, en tenant compte de l'état de l'art (séisme de Clairvaux, prédiction du mouvement sismique), afin de définir un spectre de dimensionnement de Cigéo en phase d'exploitation présentant suffisamment de provisions vis-à-vis des incertitudes relatives à la définition de l'aléa sismique.

Recommandation n° 3

L'IRSN recommande que, dans le cadre de la DAC, l'Andra consolide les fonctions de transfert par fréquence et profondeur qu'elle retient, par exemple en s'appuyant sur davantage de stations de mesures en surface et en profondeur et en complétant les résultats obtenus par de la modélisation numérique.