

Référence courrier : CODEP-DRC-2022-002107

Monsieur le directeur général de l'Andra

Montrouge, le 12 avril 2022

Objet : Projet Cigéo - Définition de l'aléa sismique en phase d'exploitation

Références : *in fine*

Monsieur le directeur,

Dans son avis du 11 janvier 2018 [6] relatif au dossier d'options de sûreté (DOS) de Cigéo, l'ASN estimait nécessaire que « *l'Andra présente et justifie, dans le dossier accompagnant la demande d'autorisation de création, les niveaux d'aléas qu'elle retient ainsi que les exigences, les critères et les méthodes pour analyser le comportement des équipements et ouvrages soumis à ces aléas, en exploitation comme après fermeture, notamment pour ce qui concerne le séisme dans la démonstration de sûreté après la fermeture du stockage.* »

À la suite de l'instruction du dossier portant sur la définition de l'aléa sismique présenté dans le DOS de Cigéo [1], vous vous êtes engagé, pour la demande d'autorisation de création (DAC) (engagement [E55-2017]¹ [2]), à justifier l'aléa sismique retenu pour la phase d'exploitation au regard de la durée de vie des installations de Cigéo, à analyser les incertitudes associées à la définition du séisme majoré de sécurité (SMS) déterminé selon la règle fondamentale de sûreté (RFS) 2001-01 [7] et à étudier la variation du mouvement sismique en profondeur. Vous avez transmis, le 12 avril 2019 [3], un dossier relatif à la justification de l'aléa sismique retenu pour le dimensionnement en phase d'exploitation des installations de surface et souterraine de Cigéo. Ce dossier a été présenté aux services de l'IRSN et de l'ASN le 18 avril 2019. Par ailleurs, vous avez envoyé, le 1^{er} juillet 2019, un dossier relatif à la détermination de la variation du mouvement sismique en profondeur [4]. Ces deux dossiers ont été complétés par une note du 29 octobre 2019 [5] précisant notamment les caractéristiques du spectre de dimensionnement de Cigéo en phase d'exploitation. Enfin, par courrier du 24 septembre 2021 [8], vous avez présenté les engagements faisant suite à l'expertise, par l'IRSN, des documents [3], [4] et [5].

Je vous prie de bien vouloir trouver en annexe les principales conclusions et demandes résultants de l'examen des documents [3], [4] et [5] relatifs à la justification de l'aléa sismique retenu pour la phase d'exploitation de Cigéo, à l'analyse des incertitudes associées à la définition du SMS et à l'étude de la variation du mouvement sismique en profondeur.

¹« L'Andra justifiera, dans le dossier de DAC, l'aléa sismique retenu pour la phase d'exploitation au regard de la durée de vie des installations de Cigéo ainsi que :

- pour les installations de surface de l'analyse des incertitudes associées à la définition du SMS, en considérant notamment des catalogues de sismicité consolidés et d'autres zonages sismotectoniques disponibles ;
- pour l'installation souterraine d'une étude de la variation du mouvement sismique avec la profondeur dans le domaine de fréquence (0,25 - 33 Hz). »

Je considère, au vu des éléments examinés jusqu'à présent, que l'aléa sismique retenu 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 différentes composantes de son calcul (caractéristiques du séisme de Clairvaux, définition des SMS, méthodes d'évaluation du mouvement sismique, fonctions de transfert du mouvement sismique en profondeur).

La prise en compte d'un tel aléa de référence suffisamment conservatif permettra de rendre plus robuste la conception de vos installations, dans la perspective d'un fonctionnement sur des durées longues.

Je vous prie d'agréer, Monsieur le directeur, l'expression de ma considération distinguée.

La directrice générale adjointe,

Signé par

Anne-Cécile RIGAIL

I. Incertitudes relatives à la définition des caractéristiques des SMS et de leurs spectres associés

La définition des séismes majorés de sécurité (SMS), en application de la RFS 2001-01 de l'ASN [7] 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 considéré. Cette sélection repose sur l'utilisation d'un zonage sismotectonique et sur une estimation des caractéristiques - magnitude et profondeur - des séismes historiques.

Des sources d'incertitudes de diverses natures associées à la définition d'un spectre SMS existent :

- a) les séismes maximaux historiquement vraisemblables² (SMHV) et leurs caractéristiques - magnitude et profondeur - peuvent être modifiés par des données récentes ou la survenue de nouveaux séismes qui peuvent interroger sur la nécessité de réévaluer le SMS retenu pour les installations nucléaires environnantes ;
- b) les accélérations spectrales des SMS dépendent des méthodes d'évaluation du mouvement sismique, qui ont connu une évolution notable depuis celles définies dans la RFS 2001-01 [7] ;
- c) 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'experts 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.

Ainsi, compte tenu des incertitudes mentionnées ci-dessus et inhérentes à la définition de l'aléa sismique, **j'estime qu'une approche conservative doit être suivie afin de disposer d'un spectre de SMS robuste pendant la phase d'exploitation de Cigéo**. Il est à noter que c'est à partir de ce spectre de SMS que vous vous assurez que le séisme de dimensionnement³ (SDD) retenu pour dimensionner les installations de surface et de profondeur de Cigéo en exploitation est enveloppe du spectre SMS.

1) *Incertitudes sur les caractéristiques des séismes de référence (a)*

Au regard de la faible sismicité de la région d'implantation du projet Cigéo, l'évaluation de l'aléa sismique ne peut s'appuyer que sur un nombre limité d'informations sur les SMHV. Les caractéristiques des séismes les moins bien connus sont en outre susceptibles d'être modifiées dans le futur avec l'évolution des connaissances. De plus, la survenue de nouveaux séismes (par exemple le séisme du Teil survenu dans la région de Montélimar en novembre 2019) interroge sur la nécessité de réévaluer le SMS retenu pour les installations nucléaires environnantes. Ainsi, bien que les nouvelles valeurs de magnitude et de profondeur assignées aux séismes de référence (SMHV de Bitche, Metz, Bligny, Wavignies, Remiremont et Bâle) soient cohérentes avec les connaissances actualisées en matière de géologie et de sismologie, les caractéristiques que vous reprenez pour le séisme de Clairvaux de 1733 (position épiscopale du séisme et, *in fine*, son intensité épiscopale) ne sont pas conservatives en comparaison de celles retenues dans SisFrance⁴. En effet, des données inédites sur ce séisme intégrées récemment dans SisFrance confirment l'hypothèse d'une localisation épiscopale différente de celle que vous avez choisie et une intensité épiscopale supérieure à celle que vous reprenez.

² Le SMHV est considéré comme le séisme le plus pénalisant susceptible de se produire sur une période de durée comparable à la période historique, soit environ 1000 ans.

³ Le SDD retenu par l'Andra au stade du DOS est un spectre présentant une accélération maximale du sol (PGA) à 0,13, établi sur la base d'une analyse probabiliste réalisée en phase d'avant-projet sommaire (Dossier 2005 Argile).

⁴ Base de données de la sismicité historique de la France (<https://sisfrance.irsn.fr>), établie à partir d'un travail d'analyse mené en commun par le BRGM, EDF et l'IRSN

Je note ainsi que cette révision des caractéristiques du séisme de Clairvaux pourrait remettre en cause le spectre des SMS que vous avez retenu à ce jour. Celui-ci apparaîtrait désormais du même ordre de grandeur que le SDD que vous retenez pour dimensionner les installations de surface et de profondeur de Cigéo en phase d'exploitation.

[D1-ALEA-SIS] Je vous demande de réviser les caractéristiques attribuées au séisme de Clairvaux dans votre application de la RFS 2001-01 [7], en retenant notamment les caractéristiques épacentrales les plus conservatives, telles qu'elles peuvent être déduites des connaissances disponibles, puis de mettre à jour le SMS retenu pour l'installation.

2) Incertitudes sur les méthodes d'évaluation du mouvement sismique (b)

S'agissant de l'incertitude sur les accélérations spectrales des SMS, vous avez présenté, dans le DOS de Cigéo, une étude prenant en compte des équations de prédiction des mouvements sismiques plus récentes, paramétrées notamment en magnitude de moment et non en magnitude d'ondes de surface, l'utilisation de cette dernière étant préconisée dans la RFS 2001-01 [7]. Cette étude conduisait à des accélérations plus fortes que celles obtenues en application de la loi de prédiction de la RFS 2001-01 [7], en particulier à hautes fréquences. **Je note cependant que, dans le dossier transmis en 2019 [3], vous ne tenez plus compte de cette analyse, alors qu'elle permet de tenir compte de l'évolution des connaissances depuis une vingtaine d'années en matière de prédiction du mouvement sismique.**

[D2-ALEA-SIS] Je vous demande, pour établir le spectre des SMS de Cigéo, de tenir compte de l'évolution de l'état de l'art relatif à la prédiction du mouvement sismique, celui-ci pouvant conduire à un spectre de SMS plus fort que celui obtenu par la loi de prédiction de la RFS 2001-01 [7], notamment pour les hautes fréquences.

Concernant la prise en compte des demandes [D1-ALEA-SIS] et [D2-ALEA-SIS], je note que vous vous êtes engagé, par courrier du 24 septembre 2021 [8], « en application de la RFS 2001-01, [à] mettre à jour [votre] étude sur l'aléa sismique en intégrant notamment des caractéristiques épacentrales plus conservatives du séisme de Clairvaux telles qu'elles peuvent être déduites des connaissances disponibles, ainsi que les équations de prédiction du mouvement sismique. » [E1-ALEA-SIS]

3) Incertitudes relatives à la définition des spectres SMS associés aux SMHV (c)

Dans le DOS de Cigéo, vous aviez 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 définie dans la RFS 2001-01 [7]. Cette approche avait été jugée pertinente par l'ASN, qui avait toutefois suggéré de la compléter en intégrant des catalogues de sismicité consolidés et d'autres zonages sismotectoniques. Ce point avait fait l'objet de votre engagement [E55-2017].

Dans le dossier transmis [3], vous présentez désormais une comparaison du spectre SMS retenu à une analyse d'incertitudes sur les spectres des SMHV, établis avec de nouveaux zonages et des caractéristiques de séismes actualisées⁵. Or l'évaluation de la robustesse du SMS retenu devrait se fonder sur une comparaison à une distribution de spectres SMS plausibles, obtenus, selon la RFS 2001-01 [7], après majoration forfaitaire de 0,5 en magnitude des SMHV. Des simulations menées par l'IRSN, considérant plusieurs zonages et la variabilité des caractéristiques – magnitude et profondeur - associées aux SMHV et ne tenant pas compte des nouveautés sur le séisme de Clairvaux conduisent à définir une distribution statistique de spectres reflétant les incertitudes associées au SMS. Selon les résultats de cette étude, le SDD que vous proposez ne couvre que 50 % des spectres SMS possibles à partir de 6 Hz. 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 conviendrait de prendre en compte. Ainsi, je note que le SDD que vous retenez actuellement n'est pas suffisamment enveloppe de l'aléa sismique (spectre SMS).

[D3-ALEA-SIS] Je vous demande de revenir à l'approche développée dans le DOS pour quantifier les incertitudes au niveau SMS, en tenant compte de l'état de l'art (séisme de Clairvaux [R1-ALEA-SIS], prédiction du mouvement sismique [R2-ALEA-SIS]), afin de définir un spectre de dimensionnement de Cigéo en phase d'exploitation présentant suffisamment de marge vis-à-vis des incertitudes relatives à la définition de l'aléa sismique (spectre SMS).

Concernant la prise en compte de cette recommandation, je note que vous proposez, dans votre courrier du 24 septembre 2021 [8], un plan d'actions prévoyant :

- « d'analyser l'effet de la prise en compte de l'étude sur l'aléa sismique (définie à l'engagement [E1-ALEA-SIS]) ainsi que de la méthode de propagation des incertitudes au niveau SMS sur le niveau du séisme de dimensionnement (SDD);
- d'identifier les ouvrages et équipements les plus sensibles à une réévaluation du SDD ;
- à l'issue de ces analyses, qui permettront d'identifier les marges de conception existantes et l'impact d'une révision de l'aléa sismique, de mener une analyse de sensibilité du dimensionnement des ouvrages et équipements à une augmentation du niveau du séisme de dimensionnement.

Dans un second temps, et sur la base de l'ensemble de ces études, l'Andra identifiera les éventuels besoins de renforcement de la conception et justifiera les choix retenus au regard des enjeux de prise en compte des incertitudes sur l'aléa sismique, et des résultats de l'analyse de sensibilité au dimensionnement des ouvrages et équipements. » [PL-ACTION-1]

Je note que, sur la base de ce plan d'actions, l'Andra s'engage « [à présenter] les conclusions d'une analyse de sensibilité de la conception à une réévaluation du SDD. Sur la base de ces éléments, [elle] proposera à l'ASN une démarche visant à justifier la robustesse de la conception et identifiera les éventuels besoins de renforcement du dimensionnement des ouvrages et équipements. » [E2-ALEA-SIS]

II. Fonctions de transfert pour la caractérisation 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, vous avez 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 de transfert calculées étant presque toujours supérieures à 1, vous concluez 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.

⁵ Le choix de l'Andra repose sur la démarche de vérification préconisée par l'ASN 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.

1) *Mesures sur site*

Les mesures réalisées sur site montrent 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 établie pour les hautes fréquences repose sur cinq séismes proches de faible magnitude et présentant 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'événements 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).

J'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, vous avez indiqué, au cours de l'instruction, votre intention de compléter, à l'échéance du dépôt de la demande d'autorisation de création, votre 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). Vous avez en outre précisé que vous prévoyez d'implanter de nouvelles stations de mesures, à différentes profondeurs et en surface.

Je considère ainsi, 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 que vous prévoyez, pourra également vous 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.

2) *Simulations numériques*

Vous avez 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 transferts numériques 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, vous souhaitez privilégier l'approche empirique par la suite et, comme indiqué ci-avant, étendre votre réseau de mesures latéralement et verticalement. Toutefois, la faible sismicité locale et régionale ne permettra pas d'obtenir suffisamment d'enregistrements avant des dizaines d'années 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, 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, **j'estime qu'il n'existe pas assez d'éléments à ce stade pour pouvoir se prononcer sur le caractère conservatif de la fonction de transfert que vous reprenez et sur le spectre de dimensionnement qui en résulte pour l'ensemble de l'installation souterraine.**

[D4-ALEA-SIS] Je vous demande de consolider les fonctions de transfert par fréquence et profondeur retenues, en s'appuyant par exemple sur davantage de stations de mesures en surface et en profondeur, et en complétant les résultats obtenus par de la modélisation numérique.

Concernant la prise en compte de la demande [D4-ALEA-SIS], vous vous êtes engagé, par courrier du 24 septembre 2021 [8], à « *[compléter] [votre] 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. Par ailleurs, [vous] [présenterez] une analyse de faisabilité quant à la mise en place d'un outil de calcul des fonctions de transfert à l'échelle de toute l'installation souterraine. [Vous] préciser[ez] dans le plan de développement de l'INB du centre de stockage (PDIS), le programme d'implantation de nouvelles stations de mesures à différentes profondeurs et en surface.* » [E3-ALEA-SIS]

III. Echéances temporelles

Les trois engagements et le plan d'actions que vous avez pris dans le cadre de l'instruction des documents [3], [4] et [5] ne comportent pas d'échéances temporelles de remise des résultats des travaux, notamment au regard de la prise de position sur le SDD à retenir pour le dimensionnement de Cigéo en phase d'exploitation.

[D5-ALEA-SIS] Je vous demande de fournir sous un mois un échéancier de remise des résultats issus de vos engagements et de votre plan d'actions.

Concernant les fonctions de transfert pour l'évaluation de l'aléa sismique en profondeur, j'estime que l'acquisition des données doit faire l'objet d'un suivi annuel.

[D6-ALEA-SIS] Je vous demande ainsi de présenter annuellement à l'ASN un bilan présentant la liste des séismes enregistrés par les capteurs sismiques, les formes d'ondes acquises aux différents capteurs sismiques et les « fonction de transfert » calculées sur la base des enregistrements acquis à date.

IV. Conclusion

Vous avez présenté un plan d'action ambitieux dont la mise en œuvre devrait permettre de répondre à la demande [D3-ALEA-SIS]. Dans l'attente de ces résultats, je considère que l'engagement [E55-2017] reste en cours de mise en œuvre. La mise en œuvre de votre plan d'actions [PL-ACTION-1] et le respect de vos engagements [E2-ALEA-SIS] et [E3-ALEA-SIS] permettront à l'ASN de se conclure sur sa clôture.

Vous avez annoncé le dépôt du dossier de demande d'autorisation du projet Cigéo pour le dernier trimestre 2022. J'estime ainsi que l'ensemble des résultats de votre plan d'actions et de vos engagements devront être disponibles dans des délais compatibles avec l'instruction de la demande d'autorisation de création du projet Cigéo.

Références :

- [1] Rapport Andra CG.RP.FGES.160065 relatif à la réévaluation de l'aléa sismique pour les futures implantations du projet Cigéo – Approches déterministe et probabiliste
- [2] Lettre Andra DG/17-0097 relative aux engagements de l'Andra et ayant pour objet projet de stockage Cigéo - Instruction du dossier relatif aux options de sûreté - livrables Cigéo 2015
- [3] Rapport Andra CG.RP.FS3C.190007 relatif à Cigéo - phase d'exploitation - analyse de la robustesse du spectre SMS de référence (SMF)
- [4] Rapport Andra CG.RP.FS3C.190017 relatif à l'estimation des mouvements sismiques transférés en profondeur pour le laboratoire souterrain du site de Cigéo
- [5] Note Andra DISEF/DIR/_19-0179 du 29 octobre 2019 relative au séisme de dimensionnement de Cigéo
- [6] Avis n° 2018-AV-0300 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 11 janvier 2018 relatif au dossier d'options de sûreté présenté par l'Andra pour le projet Cigéo de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde
- [7] Règle fondamentale de sûreté n° 2001-01 – Détermination du risque sismique pour la sûreté des installations nucléaires de base de surface
- [8] Note Andra DISEF/DIR/21-0095 du 24 septembre 2021 - Projet Cigéo : Instruction sur l'aléa sismique retenu pour le dimensionnement des installations de surface et souterraine de Cigéo