

Fontenay-aux-Roses, le 19 décembre 2019

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

Avis IRSN/2019-00288

Objet : Site CEA Cadarache  
Demande de modification de l'aléa sismique

Réf. **Lettre ASN CODEP-DRC-2018-019102 du 1<sup>er</sup> octobre 2018.**

Par lettre citée en référence, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) demande l'avis et les observations de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur le dossier joint à la demande de modification de l'aléa sismique du site CEA de Cadarache transmise par le directeur de ce site en octobre 2017.

Les études en support de cette demande sont réalisées suivant une méthode probabiliste et une déterministe au sens de la règle fondamentale de sûreté (RFS) 2001-01, publiée par l'ASN. En outre, le directeur du site CEA de Cadarache a transmis une note présentant la méthode retenue pour prendre en compte les effets de site dits particuliers et l'application de cette méthode aux installations CASCAD et CEDRA. Dans ce cadre, il a notamment répondu aux demandes formulées par l'ASN en novembre 2015, relatives aux données sismologiques du site de Cadarache.

La saisine de l'ASN porte spécifiquement sur l'aléa sismique déterminé de manière déterministe, au sens de la RFS 2001-01, ainsi que sur les évolutions apportées à la méthode de prise en compte des effets de site particuliers.

De l'expertise des éléments précités, tenant compte des informations transmises par le CEA, l'IRSN retient les points suivants.

**1. Modification de l'aléa sismique de référence**

Les niveaux d'aléa sismique actuellement retenus pour les analyses de sûreté des installations CEA du site de Cadarache sont définis dans la révision de 2010 de la « Présentation Générale de Sûreté de l'Établissement (PGSE) ». À cet égard, les études menées par le CEA depuis les années 2000 sur et autour du centre de Cadarache ont fait évoluer la connaissance des données utilisées pour définir ces niveaux d'aléa sismique. Aussi, le CEA s'appuie sur ces nouvelles données pour redéfinir ces niveaux, ce qui est satisfaisant sur le principe.

Adresse Courrier  
BP 17  
92262 Fontenay-aux-Roses  
Cedex France

Siège social  
31, av. de la Division Leclerc  
92260 Fontenay-aux-Roses  
Standard +33 (0)1 58 35 88 88  
RCS Nanterre 8 440 546 018

Pour cela, il développe tout d'abord une approche dite probabiliste qui ne fait pas partie de celles, uniquement déterministes, décrites dans la RFS 2001-01. Aussi, il a également utilisé une méthode déterministe et retenu l'enveloppe des spectres de réponse sismique des deux approches (déterministe et probabiliste). Comme indiqué dans la saisine de l'ASN, seule la caractérisation déterministe de l'aléa sismique au sens de la RFS 2001-01 est analysée dans le présent avis.

### 1.1. Définition des sources sismogènes

La définition des sources sismogènes d'un site donné s'appuie sur un zonage sismotectonique, constitué de volumes de la croûte terrestre de potentiel sismogénique homogène. Une zone sismotectonique peut être constituée par une zone géographique, une faille ou une famille de failles. En s'appuyant sur les nouvelles données disponibles, le CEA définit pour le site de Cadarache un nouveau zonage sismotectonique et un nouveau modèle de failles (incluant des failles de la couche sédimentaire et des failles de socle plus profondes). Ce modèle est notamment constitué d'un ensemble de failles constitutives de la faille de la Moyenne Durance (FMD), auquel est associée une segmentation géologique (découpage en segments auxquels sont associés des activités sismiques).

Dans le zonage sismotectonique du CEA, la zone sismotectonique PCP (Panneau de Couverture Provençale) et la faille de la Moyenne Durance (FMD) sont les sources sismogènes prépondérantes pour le site de Cadarache. La faille de la Moyenne Durance sépare la zone sismotectonique PCP, active, et la zone sismotectonique Marge Provençale (MPR), moins active, qui inclut le site de Cadarache.

Par ailleurs, les failles de socle ne sont pas considérées actives par le CEA. Or, pour l'IRSN, aucun élément ne permet d'écarter l'occurrence d'une tectonique de socle, même ténue, en lien avec une sismicité profonde. Cette sismicité a été notamment observée par le réseau sismologique de l'IRSN. De plus, les éléments de définition des contours de la zone PCP et de la segmentation géologique de la faille de la Moyenne Durance (FMD) ne sont pas explicités par le CEA. **Ceci fait l'objet de l'observation n° 1 formulée en annexe 2 de l'avis.**

### 1.2. Séismes de référence

En s'appuyant sur le nouveau zonage sismotectonique et le nouveau modèle de failles, le CEA sélectionne, à partir des séismes passés répertoriés, des séismes de référence associés aux zones et aux failles. Pour définir le séisme maximal historiquement vraisemblable (SMHV), ces séismes de référence sont artificiellement déplacés à l'intérieur de leur zone sismotectonique ou le long de leur faille, de manière à produire sur le site les intensités les plus fortes. Par exemple, les séismes de la zone du site étudié sont considérés pouvant se produire au droit de celui-ci. Les séismes de référence retenus par le CEA sont ceux de Manosque du 17 août 1708 (faille de la Moyenne Durance), de Lambesc du 11 juin 1909 (faille de Trévaresse) et de Mimet du 19 février 1984 (zone sismotectonique « Marge Provençale » du site de Cadarache). Le CEA détermine ensuite les couples magnitude de surface ( $M_s$ ) et profondeur de ces événements historiques, en utilisant une nouvelle méthode. **Les couples magnitude de surface et profondeur déterminés pour les séismes de référence retenus n'appellent pas de remarque.**

Concernant les séismes de référence pour la zone « Marge Provençale », le CEA ne tient pas compte du séisme qui s'est produit le 2 septembre 1678 dans cette zone, présentant une intensité épiscopale plus forte que celle du séisme de Mimet de 1984 mais une profondeur plus importante. Aussi, l'IRSN recommande que, dans l'état actuel des connaissances, le CEA retienne le séisme du 2 septembre 1678 parmi les séismes de référence de la zone sismotectonique « Marge Provençale » (MPR) du site. Ceci fait l'objet de la recommandation n°1 formulée en annexe 1 au présent avis.

Toutefois, en première approche, la prise en compte de ce séisme ne met pas en cause les caractéristiques du séisme majoré de sécurité (SMS) à considérer pour le site de Cadarache, défini à partir des séismes associés à la faille de la Moyenne Durance (FMD). Les autres séismes de référence retenus n'appellent pas de remarque.

### 1.3.- Paléoséisme.

Le CEA a développé plusieurs méthodes, fondées sur l'exploitation de données géologiques, géodésiques et sismologiques, visant à définir la magnitude du paléoséisme<sup>1</sup> associé à la faille de la Moyenne Durance (FMD). L'approche du CEA est cohérente avec les préconisations de la RFS 2001-01. Le CEA obtient ainsi une magnitude de surface pour le paléoséisme de  $6,2 \pm 0,3$  et retient 6,5.

La démarche du CEA est dépendante du modèle de failles utilisé et de son interprétation en termes de segmentation sismologique, notamment la capacité de plusieurs segments à rompre en même temps lors d'un séisme. Sur ce point, la segmentation de la faille de la moyenne Durance (FMD) retenue par le CEA devra être étayée. En outre, le CEA considère uniquement deux scénarios de rupture de deux segments. Pour l'IRSN, la prise en compte de plus de scénarios de rupture multi-segments permettra notamment de confirmer le caractère enveloppe de la magnitude. Ceci fait l'objet de la recommandation n°2 formulée en annexe 1 de l'avis.

Concernant la période de retour de scénarios paléosismiques, les résultats des deux méthodes d'estimation utilisées par le CEA présente des incohérences. Ceci fait l'objet de l'observation n°2 formulée en annexe 2 de l'avis.

Nonobstant, en l'état, l'IRSN considère la magnitude de surface de 6,5 retenue adaptée.

### 1.4.- Spectres de réponse

Les spectres de réponse utilisés pour étudier le comportement en cas de séisme des installations, donnant les accélérations maximales en fonction de la fréquence du mouvement, sont déterminés en considérant la loi de prédiction du mouvement sismique de la RFS 2001-01 et :

- la magnitude de surface des séismes majorés de sécurité (SMS), obtenues en majorant de 0,5 celle des SMHV, et du paléoséisme,
- la distance focale (ou hypocentrale) des séismes de référence considérés.

---

<sup>1</sup> Les paléoséismes sont des séismes survenus lors de périodes très reculées (quelques milliers à quelques dizaines voire centaines de milliers d'années), mis en évidence par les traces qu'ils ont laissé dans les couches géologiques.

*In fine*, le CEA retient pour le site de Cadarache, en dehors de la prise en compte d'éventuels effets de site particuliers (cf. §2 de l'avis), un niveau d'aléa déterministe constitué de l'enveloppe des spectres de réponse des séismes de Manosque de 1708 et du paléoséisme. Les spectres sont calculés pour les deux classes de sols (rocher et sédiment) définis dans la RFS 2001-01.

Toutefois, pour déterminer la distance hypocentrale associée au séisme de Lambesc, le CEA rattache cet événement aux failles de la Trévaresse, de la zone PCP du zonage sismotectonique. Or, le nouveau modèle de failles du CEA conduit à considérer les failles de la Trévaresse et la faille de la Moyenne Durance comme appartenant à une même zone sismotectonique et à leur attribuer une potentialité sismique analogue. **Aussi, l'IRSN estime que le séisme de Lambesc doit aussi être considéré comme un séisme associé à la faille de la Moyenne Durance et donc, placé sur le segment de faille le plus proche de ce site. Ceci fait l'objet de la recommandation n°3 formulée en annexe 1 de l'avis.**

Les distances hypocentrales considérées pour déterminer les spectres de réponse associés aux séismes de Mimet et de Manosque n'appellent pas de remarque.

La distance hypocentrale considérée pour le paléoséisme est de 18,2 km. Le CEA la justifie sur la base de la segmentation géométrique de la faille de la Moyenne Durance (FMD) qui permet, selon lui, de rattacher le paléoséisme retenu à seulement deux segments de celle-ci. À cet égard, l'IRSN considère que la segmentation proposée par le CEA pour cette faille doit être justifiée (cf. § 1.1 de l'avis). De plus, le paléoséisme se rapporte à la détermination des mouvements associés aux séismes ayant pu se produire sur la faille considérée. **Aussi, l'IRSN considère que le CEA doit déterminer la distance hypocentrale du paléoséisme en considérant son occurrence sur les segments de la faille de la Moyenne Durance les plus proches du site de Cadarache. Ceci fait l'objet de la recommandation n°4 formulée en annexe 1 de l'avis.**

À cet égard, le CEA avait, dans le cadre du réexamen de sûreté du LECA (INB n°55), retenu pour le paléoséisme une distance hypocentrale de 11,2 km en application de la RFS 2001-01, sur la base du modèle de failles présenté dans le dossier objet du présent avis. Cette distance a été considérée appropriée par l'IRSN.

**Aussi, compte tenu notamment des réserves sur les distances hypocentrales et en l'état des connaissances, l'IRSN considère que les nouveaux spectres de réponse définis par le CEA sous-estiment les accélérations des aléas sismiques à considérer en application de la RFS 2001-01. Par ailleurs, pour l'IRSN, les nouvelles données acquises par le CEA confirment que les spectres définis actuellement pour le site de Cadarache dans la PGSE de 2010 sont adaptés pour la démonstration de sûreté.**

## **2. Méthodologie de prise en compte des effets de site particuliers**

Concernant la prise en compte des effets de site particuliers (liés à une géométrie complexe des couches sédimentaires ou à une forte épaisseur de sédiments), le CEA a transmis une synthèse des recherches menées dans le cadre du programme dit CASHIMA 2 (Cadarache Seismic Hazard Integrated Multidisciplinary Assessment), ainsi qu'une note présentant la méthode de détermination du facteur d'aggravation associé à ces effets et son application aux installations CASCAD et CEDRA du site de Cadarache.

La méthode du facteur d'aggravation a notamment pour objectif d'estimer s'il y a lieu de majorer les spectres de réponse sismique définis dans la RFS 2001-01. Le facteur d'aggravation est, le cas échéant, évalué à partir d'une modélisation numérique de la réponse du site sous sollicitation sismique. Il correspond au rapport entre les spectres de réponse calculés avec des modèles de sol à deux dimensions (2D) et à une dimension (1D). Les étapes de la détermination du facteur d'aggravation sont :

- la caractérisation du milieu géologique et la construction des modèles de sol,
- les simulations numériques du mouvement sismique,
- le calcul du facteur d'aggravation.

### **3.1.- Caractérisation du milieu géologique**

Le CEA a construit un modèle 3D à l'échelle du site de Cadarache qui permet de caractériser la géométrie des principales interfaces géologiques. Il définit à partir de ce modèle, les coupes 2D au niveau de chaque installation utilisées pour évaluer le facteur d'aggravation. **L'utilisation de coupe 2D propre à chaque installation est satisfaisante.**

Concernant la caractérisation géophysique, un modèle moyen, ajusté localement avec les données disponibles, est utilisé. **À cet égard, l'IRSN considère que le CEA devrait présenter, dans la PGSE, une cartographie des points de mesures géophysiques réalisées et continuer la caractérisation géophysique et géotechnique des sols. Ces points font l'objet de l'observation n° 3 en annexe 2 de l'avis.**

Ainsi, les modèles de sol utilisés pour les installations CEDRA et CASCAD retiennent des vitesses sismiques ( $V_s$ ) différentes dans les brèches<sup>2</sup>. Sur ce point, l'IRSN considère que l'ajustement du modèle de vitesse moyen devra être justifié au cas par cas. **Ceci est inclus dans l'observation n° 4 en annexe 2 de l'avis.**

De plus, la méthode d'ajustement utilisée pour ces vitesses sismiques ne prend pas en compte la variabilité latérale des propriétés géophysiques au sein des couches géologiques dans les coupes 2D. Par ailleurs, concernant le milieu encaissant (i.e. le rocher), les modèles de sol retiennent un rocher homogène. Or, les travaux de caractérisation du site de Cadarache montrent la présence d'une couche altérée dans les premiers mètres, qui n'est pas représentée dans les modèles. **Aussi, l'IRSN estime que l'influence des hypothèses de modélisation du CEA devra être examinée, en considérant notamment des modèles de sol alternatifs et en réalisant des études de sensibilité. Ceci fait l'objet de la recommandation n° 5 de l'annexe 1 de l'avis.**

---

<sup>2</sup> Les brèches miocènes forment la base du remplissage sédimentaire des paléovallées de Cadarache sous les installations CEDRA et CASCAD. Ces brèches peuvent localement être très consolidées et présenter des vitesses sismiques élevées.

### 3.2.- Simulations numériques

Pour valider les résultats des simulations numériques, le CEA s'appuie sur des mesures de type Site-Sur-Référence (SSR), permettant d'estimer expérimentalement les éventuels effets de site au niveau des installations concernées. Ces mesures ont été obtenues à partir du déploiement, sur une quarantaine de points du site de Cadarache, de stations sismologiques. **Cette démarche et la zone couverte par les mesures sont satisfaisantes. À cet égard, l'analyse des effets du séisme du Teil du 11 novembre 2019 pourrait apporter de nouveaux éléments.**

### 3.2.- Calcul du facteur d'aggravation

Dans les applications aux installations CASCAD et CEDRA, le CEA analyse la variabilité du facteur d'aggravation en fonction de certains paramètres (points en surface sur l'emprise de l'installation, polarisation du mouvement sismique...). Il retient *in fine* une valeur pour les facteurs d'aggravation supérieure à la moyenne des résultats obtenus, qu'il considère raisonnablement enveloppe sans préciser les critères retenus. **Ce point est intégré à l'observation n° 4 de l'annexe 2 à l'avis.**

Néanmoins, en l'état et compte tenu de la valorisation des mesures de type Site-Sur-Référence (SSR), l'IRSN estime l'utilisation de la méthode de détermination du facteur d'aggravation acceptable sous réserve que soient réalisées des études de sensibilité, tel que recommandé au §3.1 de l'avis, et que les hypothèses considérées soient justifiées au cas par cas. Cette méthode pourra notamment être utilisée pour les réexamens de sûreté à venir des installations de Cadarache.

### **4.- Estimation spécifique des effets de site**

Dans les applications présentées pour les installations CASCAD et CEDRA, il est à noter un décalage entre les fréquences amplifiées selon les mesures Site-Sur-Référence (SSR) et selon l'approche numérique du facteur d'aggravation. Ceci conduit le CEA à ajuster en fréquence la définition du facteur d'aggravation de l'approche numérique. **Pour l'IRSN, ce décalage illustre la limitation de cette approche pour capturer l'ensemble des phénomènes physiques à l'origine des effets de sites.**

À cet égard, d'autres méthodes pourraient être explorées pour déterminer les effets de site, en s'appuyant sur un traitement global de la géométrie du site (modèle 3D) et les mesures Site-Sur-Référence (SSR). **Sur ce point, pour l'IRSN, une estimation empirique de l'amplification, s'appuyant sur ces mesures, présente un intérêt notable pour compléter une estimation numérique.**

Enfin, dans le cadre du programme CASHIMA, le CEA envisageait, au-delà de la méthode du facteur d'aggravation, une estimation spécifique des effets de site basée par exemple sur une modélisation complète du champ d'ondes depuis la source sismique jusqu'au site. Toutefois, en 2008, il estimait que l'état de connaissance ne permettait pas le déploiement d'une telle approche. **L'IRSN considère aujourd'hui possible d'estimer, avec un niveau de confiance raisonnable, des mouvements sismiques au droit des installations à partir d'une méthode tenant compte globalement de la géométrie de la paléovallée.**

Aussi, l'IRSN recommande que le CEA poursuive ses études pour mettre en œuvre ce type de méthode, dite d'« estimation spécifique ». Compte tenu des études disponibles, l'IRSN considère opportun de développer une telle approche dans le cadre du réexamen de sûreté de l'installation CEDRA, dont le DOR est attendu prochainement. Ceci fait l'objet de la recommandation n° 6 en annexe 1 à l'avis.

## 5.- Conclusion

À l'issue de l'expertise des éléments transmis par le CEA relatifs à l'aléa sismique du site de Cadarache, l'IRSN considère notamment que les distances hypocentrales du séisme de référence du site et du paléoséisme sont sous-estimées par le CEA. En conséquence, l'IRSN estime que les spectres d'aléa présentés par le CEA en application de la RFS 2001-01 ne sont pas satisfaisants. À cet égard, la définition de ces spectres fait l'objet des recommandations n° 1 à 4 formulées en annexe 1 à l'avis.

En outre, en tenant compte des nouvelles données, l'IRSN considère que les spectres définis actuellement pour ce site, dans la PGSE de 2010, restent adaptés pour la démonstration de sûreté.

S'agissant de la prise en compte des effets de site particuliers, les travaux importants du CEA de caractérisation (géologique et géophysique) et d'instrumentation constituent des avancées notables pour la connaissance des phénomènes sismiques au niveau du site de Cadarache. Sur cette base, en particulier du fait de l'utilisation des mesures de type Site-Sur-Référence (SSR), l'IRSN considère acceptable la mise en œuvre de la méthode du CEA de détermination du facteur d'aggravation pour ce site, sous réserve de compléter les modalités d'application de cette méthode. Cela concerne en particulier la réalisation d'études de sensibilité. Ceci fait l'objet de la recommandation n° 5 formulée en annexe 1 à l'avis.

Au-delà, les connaissances acquises ces dernières années permettent d'envisager une évaluation spécifique des mouvements sismiques, s'appuyant sur une méthode tenant compte de la géométrie des paléovallées dans sa globalité. Aussi, l'IRSN estime que le CEA devrait poursuivre ses travaux et réaliser une évaluation spécifique des mouvements sismiques dans le cadre par exemple du prochain réexamen de sûreté de l'installation CEDRA. Ceci fait l'objet de la recommandation n° 6 formulée en annexe 1 à l'avis.

Enfin, l'exploitant devrait prendre en compte les observations présentées en annexe 2 à l'avis.

Pour le Directeur général et par délégation,  
Igor LE BARS,  
Adjoint au Directeur de l'Expertise de Sûreté

**Annexe 1 à l'Avis IRSN/2019-00288 du 19 décembre 2019**

**Recommandations**

- 1) Le CEA devra retenir, dans la prochaine mise à jour de la PGSE, le séisme du 2 septembre 1678 parmi les séismes de référence de la zone sismotectonique MPR.
- 2) Le CEA devra justifier, dans la prochaine mise à jour de la PGSE, la segmentation «sismologique» de la FMD en détaillant les scénarios de rupture multi-segments retenus ou écartés pour déterminer la magnitude paléosismique associée à cette faille.
- 3) Le CEA devra, en l'état des connaissances actuelles, considérer dans la prochaine mise à jour de la PGSE, le séisme de Lambesc comme SMHV/SMS associé à la Faille de la Moyenne Durance, pour définir l'aléa de référence du site de Cadarache. La distance au site pour le séisme de Lambesc devra être réévaluée en considérant le segment de faille le plus proche du site de Cadarache.
- 4) Le CEA devra définir, dans la prochaine mise à jour de la PGSE, la distance hypocentrale du paléoséisme en considérant son occurrence sur les segments de la FMD les plus proches du site de Cadarache.
- 5) Le CEA devra intégrer dans la méthode d'évaluation du facteur d'aggravation associé aux effets de site particuliers :
  - la réalisation systématique de calculs considérant plusieurs modèles de sol alternatifs afin de tenir compte des incertitudes associées ;
  - la mise en œuvre d'études de sensibilité évaluant l'impact des hypothèses considérées (e.g. modèles de sol sans variations latérales, rocher homogène, topographie plate).
- 6) Le CEA devra réaliser, dans le cadre du prochain réexamen de sûreté de l'installation CEDRA, une évaluation des amplifications spécifiques au site tenant compte de la géométrie de la paléovallée dans sa globalité.

Annexe 2 à l'Avis IRSN/2019-00288 du 19 décembre 2019

Observations

- 1) Le CEA devrait, dans la prochaine mise à jour de la PGSE, compléter l'analyse relative au zonage sismotectonique en :
  - prenant en compte les failles de socle,
  - présentant les arguments géologiques et sismologiques permettant de définir les contours de la zone Panneau de Couverture Provençale (PCP) du zonage retenu,
  - présentant les arguments géologiques, géométriques et cinématiques permettant de justifier la segmentation géologique de la Faille de la Moyenne Durance.
  
- 2) Le CEA devrait s'assurer de la cohérence des résultats issus des méthodes mises en œuvre pour estimer la période de retour des scénarios paléosismiques dans la prochaine mise à jour de la PGSE.
  
- 3) Le CEA devrait construire un modèle 3D de propriétés de sols tenant compte de la variabilité spatiale du sol à l'échelle du site de Cadarache, sur la base de travaux de caractérisation géophysique et géotechnique. Par ailleurs, une cartographie des points de mesures géophysiques réalisées sur le site de Cadarache devrait être présentée dans la PGSE.
  
- 4) Le CEA devrait, dans la détermination du facteur d'aggravation pour chaque installation soumise à des effets de site particuliers, justifier :
  - la sélection de la (ou des) station(s) sismique(s) représentative(s) de l'installation pour l'utilisation des mesures SSR,
  - le modèle de vitesse construit par ajustement d'un modèle de vitesse moyen,
  - les critères de validation des simulations numériques par les mesures SSR,
  - le caractère « raisonnablement enveloppe » du facteur d'aggravation retenu.