

Fontenay-aux-Roses, le 25 novembre 2022

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

AVIS IRSN N° 2022-00220

Objet : Réacteurs électronucléaires – EDF – Réacteurs de 1300 MWe – Mouvements sismiques à prendre en compte pour la sûreté des installations nucléaires en application de la RFS 2001-01

Réf. : [1] Saisine ASN - CODEP-DCN-2022-012127 du 14 mars 2022.
[2] Lettre ASN - CODEP-DCN- 2016-016677 du 19 juillet 2016.
[3] Lettre ASN - CODEP-DCN-2022-028387 du 22 juin 2022.
[4] Lettre ASN - CODEP-DCN-2014-051797 du 18 décembre 2014.
[5] Lettre ASN - DGSNR/SD2/0337 du 2 juin 2003.

Par lettre citée en référence [1], l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) a sollicité l'avis de l'Institut de Radioprotection et Sûreté Nucléaire (IRSN) sur les études réalisées par Électricité de France (EDF) afin de définir les mouvements sismiques à prendre en compte, pour les réacteurs du palier 1300 MWe, en application de la règle fondamentale de sûreté (RFS) 2001-01.

Plus particulièrement, l'ASN sollicite l'avis de l'IRSN sur les points suivants :

- les évolutions méthodologiques proposées par EDF concernant les zonages et le catalogue de sismicité ;
- la prise en compte de la demande n° 9 de l'ASN figurant dans la lettre en référence [2] de consolider la calibration¹ des modèles d'atténuation de l'intensité macrosismique² pour la détermination des couples magnitude³ profondeur des séismes historiques ;
- la pertinence des choix d'EDF concernant les séismes de référence permettant la définition des SMHV ;
- le caractère suffisamment enveloppe, en l'état des connaissances actuelles, du niveau des spectres SMS proposés par EDF.

¹ La calibration d'un modèle d'atténuation de l'intensité macrosismique consiste à établir une relation empirique entre les intensités et les paramètres magnitude profondeur. Pour établir cette relation, des séismes dits de calibration, pour lesquels ces informations sont disponibles, sont utilisés.

² L'intensité macrosismique est une quantité qui exprime les effets d'un séisme sur les personnes, les immeubles et le paysage en un lieu donné.

³ La magnitude est un paramètre qui exprime l'ampleur d'un séisme. Parmi les différentes échelles de magnitude, la magnitude d'onde de surface exprime l'ampleur d'un séisme à partir de l'amplitude des ondes de surface enregistrée lors du séisme à des distances supérieures à plusieurs centaines de kilomètres.

L'ASN a précisé [1] que les conclusions de cette expertise seront a priori valorisées uniquement et le cas échéant à l'occasion du cinquième réexamen périodique des réacteurs de 1300 MWe. Ainsi, s'agissant des études de sûreté qui seront effectuées en support au quatrième réexamen périodique du palier 1300 MWe (RP4 1300), l'ASN et EDF ont convenu de conserver les niveaux de SMS présentés par EDF à l'occasion du troisième réexamen périodique des réacteurs de 1300 MWe (RP3 1300).

Par ailleurs, l'ASN a sollicité l'avis de l'IRSN sur les études réalisées par EDF sur les effets de site particuliers [3] ; ce sujet sera traité dans un avis dédié.

Pour rappel, la RFS 2001-01 précise les différentes étapes de la démarche à suivre pour élaborer les SMS. Cette démarche consiste à définir et retenir un zonage sismotectonique⁴ pour sélectionner les séismes de référence à partir de la base de données de sismicité historique de la France métropolitaine (SisFrance⁵). Les séismes de référence retenus dans chaque zone sont ensuite translatés au plus près du site. Le séisme de référence ayant l'impact le plus fort au site est alors retenu comme étant le « séisme maximal historiquement vraisemblable » (SMHV). Dans certaines configurations, plusieurs séismes peuvent être retenus. L'intensité macrosismique au site et la magnitude de ce séisme sont ensuite majorées pour définir le « séisme majoré de sécurité » (SMS). Il est à noter que la magnitude et la profondeur des séismes historiques sont déterminées à partir des informations sur les intensités. Les spectres de réponse (SMHV et SMS) de ces séismes sont calculés avec la loi de prédiction du mouvement sismique définie par la RFS 2001-01. Dans le cas où une faille active aurait produit une rupture de surface (faille capable), un spectre de paléoséisme doit être défini pour compléter le spectre SMS. Le paléoséisme reflète le potentiel d'une faille à produire des séismes au cours d'une période de quelques dizaines de milliers d'années. Enfin, la RFS 2001-01 préconise que le spectre retenu pour définir l'aléa ne pourra pas être inférieur à un spectre minimal forfaitaire (SMF) calé en accélération à 0,1 g à la fréquence infinie.

En réponse aux demandes de l'ASN, l'IRSN a tout d'abord expertisé :

- la méthode établie par EDF pour étudier les failles à proximité des sites, ainsi que la déclinaison de cette méthode pour certains sites du palier 1300 MWe ;
- la nouvelle méthode mise en place par EDF pour déterminer les caractéristiques des couples magnitude profondeur des séismes historiques qui constituent in fine le catalogue de sismicité.

L'IRSN a ensuite effectué une analyse site par site portant à la fois sur le zonage retenu, la sélection des séismes de référence et le caractère enveloppe des spectres SMS retenus par EDF.

1. ÉTUDE DES FAILLES À PROXIMITÉ DES SITES

Les conclusions de l'expertise de l'IRSN des dossiers transmis par EDF à l'occasion du troisième réexamen de sûreté des réacteurs de 1300 MWe avaient conduit l'ASN à demander à EDF « *d'établir un état des lieux des données scientifiques existantes relatives à la connaissance des failles actives dans un rayon de 25 km autour des réacteurs électronucléaires* » et « *de définir et de conduire un programme d'étude géologique et géophysique approprié* » [4].

En réponse à cette demande, EDF a présenté une méthode d'investigation graduée des failles dans la région des 25 km autour des sites nucléaires afin d'identifier d'éventuelles failles capables. Pour l'essentiel, cette méthode reprend les principales préconisations de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) pour ce qui concerne l'étude des failles à proximité de sites nucléaires.

⁴ Un zonage sismotectonique délimite des volumes de la croûte terrestre dans lesquels le potentiel sismogénique est considéré homogène. Une zone sismotectonique peut être constituée par une zone géographique, une faille ou une famille de failles.

⁵ La base de données SisFrance est établie dans le cadre d'une collaboration entre le Bureau de Recherches Géologiques et Minières, EDF et l'IRSN ; elle est accessible via le site internet <http://www.sisfrance.net>.

Par ailleurs, l'IRSN partage avec EDF la nécessité d'intégrer dans cette méthode le retour d'expérience du séisme du Teil associé à une faille non identifiée comme potentiellement active (et a fortiori capable) avant 2019. À la suite du séisme du Teil, EDF a lancé dans la région des sites de Cruas et du Tricastin un programme d'acquisition de nouvelles données géophysiques pour investiguer les failles, et mène des études de terrain sur la faille responsable du séisme et sur les failles associées. Cette démarche permettra de proposer, par le retour d'expérience, des pistes d'évolutions possibles de la méthode d'investigation graduée proposée par EDF.

L'IRSN considère également pertinente la proposition d'EDF d'intégrer dans sa méthode une analyse critique des bases de données néotectoniques. Il s'agit en particulier d'examiner les indices d'activité des failles pour lesquels les auteurs n'ont pas tranché (c'est-à-dire les indices qualifiés de « possible » ou « en cours d'étude »).

L'IRSN considère que l'évolution méthodologique proposée par EDF pour l'investigation des failles répond dans son principe à la demande formulée par l'ASN et s'attache à suivre les grandes lignes préconisées par la RFS 2001-01 et les publications de l'AIEA. Étant donné l'engagement d'EDF de faire évoluer la méthode sur la base du retour d'expérience des investigations en cours dans la région du Teil, ce point n'appelle pas d'autre commentaire.

2. ÉVOLUTION MÉTHODOLOGIQUE CONCERNANT LA CARACTÉRISATION DES COUPLES MAGNITUDE PROFONDEUR POUR ÉTABLIR UN CATALOGUE DE SISMICITÉ

En réponse à la demande n° 9 formulée par l'ASN [2] de consolider la calibration des modèles d'atténuation de l'intensité macrosismique, EDF a présenté une nouvelle méthode pour caractériser les magnitudes et les profondeurs des séismes historiques, appliquée au millésime 2017 des connaissances figurant dans la base de données SisFrance. Cette méthode conduit à la construction d'un catalogue de sismicité historique dit « MsCat ».

Les paramètres magnitude (M) et profondeur (h) d'un séisme historique sont établis à partir de relations empiriques (ci-après nommées modèles I-M-h) qui corrélient ces deux paramètres à la distribution géographique des intensités macrosismiques (I) décrivant l'impact du séisme dans une région donnée. Les estimations d'intensité macrosismique des séismes historiques connus en France métropolitaine et à proximité sont compilées et mises à jour régulièrement dans la base de données SisFrance.

Les chapitres ci-dessous examinent successivement la calibration des modèles I-M-h dans la nouvelle méthode d'EDF et les modalités d'application de cette nouvelle méthode.

2.1. CALIBRATION DES MODÈLES I-M-h

Par rapport aux éléments transmis dans le cadre du RP4 900, la nouvelle méthode d'EDF s'appuie sur une formulation mathématique des modèles I-M-h qui prend en compte les incertitudes sur les données d'entrée. À ce sujet, **L'IRSN estime que, dans son principe, la méthode pour la détermination des couples magnitude profondeur des séismes historiques proposée par EDF présente plusieurs évolutions positives et répond globalement à la demande n° 9 formulée par l'ASN dans la lettre en référence [2].**

En revanche, la calibration des modèles I-M-h appelle des commentaires de la part de l'IRSN sur le choix des séismes utilisés pour la calibration et la profondeur associée à ces séismes. De plus, EDF a procédé à une sélection des modèles I-M-h finalement mis en œuvre (24 modèles) qui appelle également des commentaires.

S'agissant du choix des séismes de calibration, l'IRSN relève que, parmi ceux retenus par EDF, huit d'entre eux présentent un champ macrosismique incomplet ou appartiennent à une séquence sismique⁶. L'IRSN, considérant que ce choix n'est pas adapté, a sollicité EDF pour obtenir de sa part un test de sensibilité visant à explorer

⁶ Une séquence sismique est une série de séismes ayant lieu dans une zone restreinte et pendant un intervalle de temps limité.

l'impact de ces séismes sur la calibration des modèles I-M-h. **EDF n'ayant pas transmis au cours de l'expertise les éléments d'appréciation du comportement des modèles I-M-h en excluant ces séismes de la calibration, l'IRSN formule la recommandation n° 1 présentée en annexe.**

Pour ce qui concerne le choix des profondeurs associées aux séismes de calibration, l'estimation des gammes de profondeurs plausibles faite par EDF repose en partie sur des profondeurs non issues de données instrumentales ou de la connaissance de la tectonique de la région, ce qui, pour l'IRSN, n'est pas satisfaisant dans son principe. De plus, l'appréciation d'expert qui a conduit à ce choix n'est pas suffisamment documentée dans le dossier fourni par EDF et l'impact de ce choix n'a pas été présenté.

Pour sa part, EDF considère qu'il a « *réalisé un nombre très important d'études de sensibilité et de validation et a abouti à un résultat considéré le « mieux possible » étant donné les limites et incertitudes intrinsèques à l'échelle de magnitude M_s* » et que réaliser des « *tests supplémentaires ne permettra pas de converger sur la méthode* ».

L'IRSN est conscient des difficultés associées au développement et à la mise en œuvre d'une méthode pour constituer un catalogue de sismicité. **L'IRSN estime toutefois nécessaire qu'EDF présente des tests de sensibilité sur la calibration des 24 modèles utilisés in fine, en utilisant des gammes de profondeur issues de préférence de données instrumentales. L'IRSN formule ainsi la recommandation n° 2 présentée en annexe.**

EDF a effectué un nombre important d'analyses lors de la définition des modèles I-M-h. Cela a conduit à établir 2880 modèles I-M-h. Parmi ces modèles, EDF a sélectionné 96 modèles dits « base case », puis retient finalement 24 modèles. L'IRSN considère que, si la sélection des 96 modèles « base-case » apparaît appropriée, l'étape suivante de sélection n'est en revanche pas suffisamment argumentée. En particulier, il apparaît nécessaire de s'assurer que ces 24 modèles sont les plus pertinents parmi les 96 modèles « base-case ». **Ainsi, l'IRSN estime nécessaire qu'EDF présente des tests de validation des 96 modèles I-M-h retenus dans son « base-case » vis-à-vis de séismes instrumentaux⁷. Ceci conduit l'IRSN à formuler la recommandation n° 3 présentée en annexe.**

2.2. MODALITÉS D'APPLICATION DE LA NOUVELLE MÉTHODE

EDF applique sa nouvelle méthode à l'ensemble des séismes historiques de la base de données SisFrance afin de construire son catalogue MsCat. Cependant, les 24 modèles I-M-h sélectionnés par EDF ne sont pas systématiquement appliqués à tous ces séismes. En effet, EDF définit trois protocoles d'application des modèles I-M-h. L'un ou l'autre de ces protocoles est appliqué selon les caractéristiques des intensités macrosismiques de chaque séisme. Ces protocoles sont les suivants :

- « *Complete Logic Tree* » : ce protocole est appliqué aux séismes ayant un nombre suffisant d'intensités et dont l'épicentre se situe à l'intérieur des frontières françaises. La magnitude et la profondeur sont issues de l'application de l'ensemble des modèles aux intensités macrosismiques ;
- « *Simplified Logic Tree* » : ce protocole est appliqué aux séismes ayant un nombre suffisant d'intensités et dont l'épicentre se situe à l'extérieur des frontières françaises. La magnitude et la profondeur sont issues de l'application de huit modèles (dits associés à la méthode « RF ») qui n'exploitent que l'intensité macrosismique épiscopentrale⁸ et une seule isoséiste⁹ située généralement loin de l'épicentre ;
- « *lo strategy* » : Ce protocole est appliqué aux séismes ayant peu d'informations sur les intensités. La magnitude est issue de l'application de l'ensemble des 24 modèles à la seule intensité macrosismique épiscopentrale. La profondeur est fixée sur la base des connaissances sur la région d'occurrence du séisme.

La mise en œuvre du protocole « *lo strategy* » n'appelle pas de commentaire de la part de l'IRSN.

⁷ C'est-à-dire enregistrés par des capteurs sismiques.

⁸ La valeur d'intensité à l'épicentre du séisme, l'épicentre étant la projection à la surface du foyer du séisme.

⁹ L'isoséiste étant une ligne qui relie les lieux ayant subi la même intensité macrosismique.

En revanche, s'agissant du protocole « *Simplified Logic Tree* », l'IRSN estime que l'application des huit modèles I-M-h considérés pour l'estimation de la profondeur des séismes n'est pas pertinente. Ce paramètre est en effet piloté par la décroissance de l'intensité avec la distance dans la zone épiscopale et nécessite de prendre en compte plusieurs isoséistes en zone épiscopale ; or ces huit modèles ne tiennent pas compte de cette information. La même remarque s'applique au protocole « *Complete Logic Tree* » qui utilise notamment ces huit modèles.

Ces éléments conduisent l'IRSN à formuler la recommandation n° 4 présentée en annexe.

2.3. CONCLUSION

Par rapport aux éléments transmis dans le cadre du RP4 900, la nouvelle méthode d'EDF s'appuie sur une formulation mathématique des modèles I-M-h qui prend en compte les incertitudes sur les données d'entrée, ce qui est satisfaisant. Plus généralement, **l'IRSN estime que, dans son principe, la méthode pour la détermination des couples magnitude profondeur des séismes historiques proposée par EDF présente plusieurs évolutions positives et répond globalement à la demande n° 9 formulée par l'ASN dans la lettre en référence [2].**

Néanmoins, il est nécessaire pour l'IRSN de disposer d'éléments complémentaires pour vérifier le bien-fondé de choix et d'hypothèses retenus par EDF dans les phases de calibration et d'application de la méthode pour déterminer les couples M-h des séismes de référence. Ces éléments font l'objet des recommandations n° 1 à n° 4 présentées en annexe.

3. ÉVALUATION DU CARACTÈRE SUFFISAMMENT ENVELOPPE DES SPECTRES SMS PROPOSÉS PAR EDF

L'ASN demande dans la saisine [1] l'avis de l'IRSN sur « *le caractère suffisamment enveloppe, en l'état des connaissances actuelles, du niveau des spectres SMS proposés par EDF.* ». À cet égard, l'ASN a précisé, dans son courrier de 2003 en référence [5] qu'« *il convient de veiller à ce que les SMS résultant de la démarche de calcul et par conséquent des choix d'hypothèses de l'exploitant couvrent le cas échéant les SMHV établis sur la base d'hypothèses tout aussi cohérentes vis-à-vis de la démarche décrite dans la RFS 2001-01* ».

L'IRSN a ainsi mis en œuvre, depuis le RP3 1300, une méthode qui vise à prendre en compte différentes interprétations disponibles des données relatives au zonage et aux caractéristiques des séismes de référence. Cette méthode permet à ce jour de propager l'incertitude liée à la définition des zonages sismotectoniques et celle liée à l'estimation des caractéristiques de magnitude M et de profondeur h des séismes historiques à partir de leurs champs macrosismiques.

La méthode conduit à construire une distribution de spectres SMHV en intégrant les nouvelles connaissances sur les zonages et les catalogues sismiques. Cette distribution est comparée au spectre d'aléa établi par EDF, défini par l'enveloppe du SMF et du SMS. Ainsi, si le niveau d'aléa couvre le 84^{ème} fractile de la distribution des spectres SMHV alternatifs (SMHV-84), le spectre est considéré comme suffisamment enveloppe. Pour le cas où le niveau d'aléa ne couvre pas le SMHV-84, l'IRSN conduit une analyse complémentaire des hypothèses sous-jacentes au calcul des spectres SMHV afin d'identifier celles qui pèsent dans la définition du SMHV-84 et de s'assurer de leur fiabilité.

Les réacteurs de 1300 MWe sont répartis sur huit sites : Belleville, Cattenom, Flamanville, Golfech, Nogent, Paluel, Penly, et Saint-Alban. À l'issue de l'expertise de l'IRSN, seuls les niveaux d'aléa sismique définis par EDF pour les sites de Cattenom et de Saint-Alban appellent des commentaires de la part de l'IRSN.

S'agissant du site de Cattenom, le SMS est piloté par le séisme de Clairvaux (1733 – Luxembourg). L'IRSN souligne que, dans le millésime 2017 de la base de données SisFrance, ce séisme est documenté par peu de données macrosismiques et que ses paramètres M-h sont donc associés à de fortes incertitudes. Or la localisation et l'intensité épiscopale de ce séisme ont fait l'objet d'une révision dans la base de données SisFrance en 2021. **Par**

conséquent, l'IRSN estime nécessaire qu'EDF révise l'aléa sismique pour le site de Cattenom en tenant compte des caractéristiques du séisme de Clairvaux (1733) intégrées par le consortium SisFrance en 2021. Ceci fait l'objet de la recommandation n° 5 présentée en annexe. Cette révision devra être réalisée dans un délai permettant de vérifier le niveau de l'aléa sismique qui est retenu pour le site de Cattenom dans les études associées au RP4 1300 (à savoir celui qui a été accepté dans le cadre du RP3 1300).

Enfin, pour ce qui concerne le site de Saint-Alban, l'IRSN souligne qu'EDF n'a pas considéré, pour la détermination du SMS, le séisme de la Tour du Pin (1889) tel que demandé par l'ASN dans le cadre du RP3 1300 [4]. Si la prise en compte de ce séisme pour définir l'aléa sismique permet de couvrir le SMHV-84, tel n'est pas le cas de la nouvelle proposition faite par EDF qui se situe nettement en-dessous du 84^{ème} fractile établi par l'IRSN. **Ainsi, la nouvelle proposition d'aléa sismique établie par EDF pour le site de Saint-Alban n'est pas acceptable.**

IRSN

Le Directeur général

Par délégation

Frédérique PICHEREAU

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté

ANNEXE À L'AVIS IRSN N° 2022-00220 DU 25 NOVEMBRE 2022

Recommandations de l'IRSN

Recommandation N° 1

L'IRSN recommande que, pour compléter la justification de sa nouvelle méthode pour la détermination des couples magnitude profondeur des séismes historiques, EDF réalise, lors de la prochaine utilisation de cette méthode, un test de sensibilité sur la calibration des 24 modèles utilisés pour la construction du catalogue MsCat, en excluant les séismes avec un champ macrosismique incomplet ou appartenant à une séquence sismique. Cela concerne les séismes dont les identifiants dans la base SisFrance sont : 740157, 1100014, 10003850, 10004167, 10003401, 10003544, 10003853.

Recommandation N° 2

L'IRSN recommande que, pour compléter la justification de sa nouvelle méthode pour la détermination des couples magnitude profondeur des séismes historiques, EDF réalise, lors de la prochaine utilisation de cette méthode, des tests de sensibilité sur la calibration des 24 modèles utilisés pour la construction du catalogue MsCat, en utilisant des gammes de profondeurs issues préférentiellement de données instrumentales ou de la connaissance tectonique de la région.

Recommandation N° 3

L'IRSN recommande que, pour compléter la justification de sa nouvelle méthode pour la détermination des couples magnitude profondeur des séismes historiques, EDF présente, lors de la prochaine utilisation de cette méthode, les résultats des tests de validation des 96 modèles I-M-h retenus dans son « base-case » vis-à-vis de séismes instrumentaux. Ces tests doivent être effectués *a minima* pour la totalité des séismes sélectionnés par EDF pour la calibration avec leur magnitude de surface native, la liste étant le cas échéant étendue à des séismes récents.

Recommandation N° 4

L'IRSN recommande que, pour compléter la justification de sa nouvelle méthode pour la détermination des couples magnitude profondeur des séismes historiques, EDF applique, lors de la prochaine utilisation de cette méthode, les modèles I-M-h associés aux isoséistes calculées par la méthode RF dans les protocoles « Simplified Logic Tree » et « Complete Logic Tree » en utilisant une gamme de profondeurs plausibles établie sur la base des connaissances sismotectoniques de la région.

Recommandation N° 5

L'IRSN recommande qu'EDF revise l'aléa sismique pour le site de Cattenom en tenant compte des caractéristiques du séisme de Clairvaux (1733) définies dans la version 2021 de la base de données SisFrance.