

Fontenay-aux-Roses, le 31 mars 2017

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

Avis IRSN/2017-00118

Objet : Réacteurs électronucléaires - EDF - Instruction de la prescription [ECS-ND9] du 21 janvier 2014 - Guides méthodologiques de capacité sismique

Réf. Saisine ASN CODEP-DCN-2015-023960 du 22 juin 2015

À la suite de l'accident survenu en mars 2011 au Japon dans la centrale de Fukushima Dai-ichi, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a demandé à Électricité de France (EDF) de réaliser des évaluations complémentaires de sûreté (ECS) de la robustesse de ses réacteurs nucléaires à l'égard d'événements extrêmes de même nature que ceux ayant entraîné la catastrophe de Fukushima et non pris en compte dans le référentiel de sûreté.

À l'issue de ces évaluations, l'ASN a prescrit à EDF de mettre en œuvre des mesures de renforcement de la sûreté de ses sites électronucléaires, notamment par la mise en œuvre d'un « *noyau dur* » de dispositions matérielles et organisationnelles, afin de faire face à ces situations extrêmes. Le noyau dur est constitué pour partie d'un ensemble de structures, systèmes et composants (SSC) qui sont soit des SSC déjà existants sur les réacteurs nucléaires, soit des SSC nouveaux qu'EDF doit mettre en place sur ses sites.

Afin de préciser les hypothèses de conception et de vérification des SSC du noyau dur, l'ASN a édité un ensemble de prescriptions techniques complémentaires en date du 21 janvier 2014, en particulier la prescription technique [ECS-ND9] :

*« ...Pour les SSC existants dont la justification en situations noyau dur ne pourrait être acquise sur la base des règles de conception et de construction codifiées ou, à défaut, conformes à l'état de l'art, [l'exploitant] justifie ces SSC sur la base de méthodes déterministes réalistes ; il utilise en tout état de cause des critères garantissant la fonctionnalité des SSC vis-à-vis des missions qu'ils ont à accomplir en situations noyau dur. Dans les cas où la justification sur la base de ces méthodes n'est pas acquise, l'exploitant étudie le remplacement ou le renforcement de ces SSC. ».*

En réponse à cette prescription, EDF a transmis un ensemble de guides méthodologiques relatifs à la justification du comportement des SSC existants appartenant au noyau dur sous l'effet d'un séisme extrême, dit « *séisme noyau dur* » (SND). L'objectif de ces guides est de définir les

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

méthodes d'analyse et les critères de vérification associés à la catégorie de SSC considérée, afin de définir leur capacité sismique, qui sera ensuite comparée à la sollicitation SND.

Par la lettre citée en référence, l'ASN sollicite l'avis et les observations de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) relatifs aux guides méthodologiques transmis par EDF pour la justification du comportement :

- des structures en béton armé ou en béton précontraint et des charpentes métalliques ;
- des grands réservoirs verticaux à fond plat ;
- des échangeurs et des réservoirs à fonds bombés.

Les autres guides méthodologiques (relatifs aux ancrages des matériels et aux autres catégories de matériels) feront l'objet d'un avis ultérieur de l'IRSN.

Les guides méthodologiques relatifs aux grands réservoirs verticaux à fond plat, aux échangeurs et réservoirs à fonds bombés ayant fait l'objet d'une révision au début de l'instruction, l'analyse de l'IRSN porte sur le dernier indice de ces documents. Par ailleurs, une mise à jour du guide méthodologique pour la justification du comportement des structures en béton armé ou béton précontraint et des charpentes métalliques ainsi qu'une note de justification des déformations de ces ouvrages ont été transmises à la suite de l'instruction. L'ensemble de ces éléments est intégré à l'analyse de l'IRSN.

De l'examen des éléments transmis par EDF, il ressort les points exposés ci-après.

#### **Guide relatif aux ouvrages de génie civil (structures en béton armé ou béton précontraint et charpentes métalliques)**

Lors des réexamens de sûreté, la réinterprétation directe des résultats du dimensionnement au séisme selon le référentiel des installations nucléaires de base (INB) peut mettre en évidence des marges vis-à-vis du séisme majoré de sécurité (SMS). De plus, l'analyse critique des méthodes de dimensionnement des ouvrages existants peut mettre en évidence d'autres marges.

Pour l'IRSN, ces pratiques sont tout aussi pertinentes pour évaluer le comportement des SSC du noyau dur pour des chargements sismiques de niveau SND.

Dans le cadre du déploiement du noyau dur, le principe de la méthode proposée par EDF consiste à postuler des endommagements « admissibles », plus importants que ceux admis en dimensionnement. Dès lors, ces endommagements « admissibles » sont valorisés en tant que marges disponibles dans la démonstration de la fonctionnalité des SSC du noyau dur.

Cette méthode diffère des principes retenus pour les réexamens de sûreté et ne peut donc pas apporter le même niveau de confiance dans la démonstration de sûreté.

À cet égard, l'IRSN estime nécessaire qu'EDF réalise une première évaluation du comportement des ouvrages de génie civil du noyau dur en cas de SND en appliquant des méthodes utilisées lors des réexamens de sûreté des installations et établisse un état des écarts issus de l'application de ces méthodes, en préalable au déploiement des justifications intégrant les endommagements. Cette pratique devrait permettre de statuer sur la capacité de certains ouvrages à présenter une résistance suffisante en cas de SND, compatible avec la fonctionnalité des SSC du noyau dur, notamment du fait de la mise en exergue des marges disponibles issues du dimensionnement initial des REP. Ce point fait l'objet de la **recommandation n° 1** présentée en annexe 1.

Concernant plus particulièrement les enceintes de confinement et les piscines du bâtiment du réacteur (BR) et du bâtiment du combustible (BK), et en regard de l'importance des démonstrations attendues, l'IRSN considère que la méthode proposée par EDF dans son guide relatif aux ouvrages de génie civil n'est pas adaptée et estime que les justifications associées à la fonctionnalité de ces ouvrages particuliers devront être apportées en application des méthodes usuelles de réexamen limitant l'endommagement de ces ouvrages à des valeurs compatibles avec les fonctions de rétention ou de confinement qui leur sont attribuées. Ce point fait l'objet de la **recommandation n° 2** présentée en annexe 1.

Par ailleurs, l'IRSN considère que la conformité des SSC existants à leur référentiel en vigueur est un prérequis majeur et incontournable en regard de la fiabilité attendue des évaluations du comportement des SSC du noyau dur. À cet égard, la démarche d'EDF relative à la vérification de la conformité des SSC du noyau dur paraît adaptée.

Comme indiqué plus haut, EDF souhaite par sa démarche aller au-delà des pratiques de réexamen de sûreté des REP en admettant des endommagements limités mais supérieurs à ceux admis dans ce cadre. Ces endommagements se traduisent par l'assouplissement des structures en béton, l'augmentation des amortissements globaux et une certaine relaxation des contraintes compte tenu de la ductilité des éléments de structures. Pour quantifier ces effets, EDF retient, en se les appropriant, des méthodes de justification adaptées des pratiques internationales. Cette démarche alternative revient à adopter des critères moins exigeants que ceux du référentiel d'analyse sismique des installations nucléaires de base (INB). In fine, EDF « valorise » les effets de l'endommagement sous la forme de marges supplémentaires, disponibles dans le cadre des démonstrations de la fonctionnalité des SSC du noyau dur en cas de SND. EDF estime que le maintien la fonctionnalité est garanti par la prudence avec laquelle il s'approprie et applique cette démarche alternative.

Ainsi, alors que les analyses admises lors des réexamens de sûreté limitent la prise en compte de l'endommagement, ce qui se traduit par des conservatismes non quantifiés mais disponibles garantissant la robustesse et l'absence d'effet falaise, la démarche alternative proposée par EDF vise à valoriser ces marges. Néanmoins, cette démarche ne bénéficie pas d'une analyse critique associée à un retour d'expérience de son application aux REP, alors que la démonstration attendue de la fonctionnalité des SSC du noyau dur en cas de SND doit être apportée avec un niveau de confiance suffisant.

Dans ce contexte, l'IRSN formule les recommandations qui suivent afin que certaines hypothèses et options de cette démarche alternative soient acceptables et mieux justifiées, en amont de leur application.

En préalable, et bien que les ancrages des matériels soient traités dans un guide spécifique qui fera l'objet d'un avis ultérieur, l'IRSN souligne qu'un comportement ductile des ancrages et des assemblages des éléments de structures est valorisé par EDF dans le guide relatif aux ouvrages de génie civil. L'IRSN estime qu'EDF ne présente pas les éléments suffisants pour justifier que cette pratique est acceptable, notamment à l'égard des effets de l'endommagement potentiel de ces éléments de liaison des structures. Ce point fait l'objet de la **recommandation n° 3** présentée en annexe 1.

Pour les ouvrages de génie civil, l'IRSN considère que la fonctionnalité des structures susceptibles de subir un endommagement au cours du SND n'est pas acquise en cas de survenue des répliques sismiques. Ce point fait l'objet de la **recommandation n° 4** présentée en annexe 1.

L'IRSN estime par ailleurs nécessaire que les chargements à considérer concomitamment aux charges sismiques associées au SND, notamment les charges variables, fassent l'objet de compléments de démonstration de la part d'EDF. Ce point fait l'objet de la **recommandation n° 5** présentée en annexe 1.

Concernant l'évaluation du comportement sismique des ouvrages, EDF considère qu'un certain endommagement peut être pris en compte en adaptant les études usuelles d'analyse du comportement des ouvrages de génie civil des réacteurs à eau pressurisée (REP). Dans cette démarche, EDF considère :

- la fissuration des structures en béton armé par l'abaissement sensible du module de Young du matériau béton armé, en fonction des éléments concernés et de leurs sollicitations ;
- l'augmentation de l'amortissement associé à l'endommagement des structures en béton armé ;
- la capacité de ductilité des éléments pour la justification de leur résistance ;
- l'augmentation des déplacements due à l'endommagement des structures en béton armé.

L'IRSN estime nécessaire que des justifications de la pertinence et de la validité de l'abaissement de la rigidité des planchers, poteaux et poutres en béton, considéré dans les études des ouvrages, soient apportées dans les dossiers de justification du comportement sismique des ouvrages SSC du noyau dur. Ce point fait l'objet de la **recommandation n° 6** présentée en annexe 1.

La prise en compte de l'endommagement par l'augmentation de l'amortissement des structures et l'introduction de coefficients de ductilité des structures en béton armé et en charpente métallique constitue l'apport le plus important et « innovant » dans la démarche proposée par EDF, en complément des pratiques utilisées et acceptées lors des réexamens de sûreté. Sur ce point, EDF estime que, dans la démarche proposée, les valeurs retenues restent prudentes par rapport à l'application des normes, codes et recommandations dédiés à ces pratiques (Eurocodes, AIEA, ASCE).

Pour l'IRSN, l'augmentation de l'amortissement conduit nécessairement à la diminution de l'estimation qui est faite de la réponse sismique, à la fois en termes d'efforts et de déplacements. À ce titre, et compte tenu de son caractère forfaitaire, cette hypothèse nécessite d'être validée. Aussi, l'IRSN n'est pas

favorable à l'adoption de valeurs d'amortissement au-delà des valeurs préconisées dans le guide ASN 2/01. Ce point fait l'objet de la **recommandation n° 7** présentée en annexe 1.

Par ailleurs, l'IRSN considère que la prise en compte de la ductilité des structures de génie civil devra être accompagnée de la vérification de l'absence de risque d'instabilité locale des éléments de structure et de l'absence de fragilité des ouvrages, par exemple dans le cas de renforcements existants. Ce point fait l'objet de la **recommandation n° 8** présentée en annexe 1.

Enfin, l'IRSN estime que le recours à des analyses complémentaires ou alternatives de type non-linéaires ne devrait pas être envisagé, dans son principe. L'IRSN considère que si ces méthodes nécessitent d'être mises en œuvre, alors elles devront présenter un niveau de confiance suffisant pour juger du respect des exigences retenues. Ce point fait l'objet de l'**observation** présentée en annexe 2.

**En conclusion de son évaluation, l'IRSN estime que la démarche présentée par EDF pour justifier le comportement des ouvrages de génie civil sous SND, qui répond à l'aspect gradué de la prescription [ECS-ND9] de l'ASN, est acceptable dans son principe, sous réserve de la prise en compte des recommandations présentées supra.**

Néanmoins, il est aujourd'hui trop tôt pour évaluer les écarts entre les sollicitations correspondant au séisme SND et les sollicitations correspondant au séisme de dimensionnement (SDD) des REP. Dès lors, il apparaît difficile d'estimer dans quelle mesure les dossiers de justification des ouvrages de génie civil, SSC du noyau dur, feront appel aux différentes justifications « innovantes et spécifiques » que propose EDF pour évaluer l'état d'endommagement des ouvrages de génie civil qui serait atteint en cas de SND, et pris en compte dans la démonstration de la fonctionnalité du noyau dur.

**Pour pouvoir se prononcer in fine, l'IRSN aura besoin d'évaluer l'application de cette démarche alternative aux structures les plus sensibles des sites pour lesquels l'écart entre le SND et le SDD est le plus important.**

### **Guides relatifs aux grands réservoirs verticaux à fond plat, aux échangeurs et réservoirs à fonds bombés**

Les matériels du noyau dur entrant dans le périmètre d'application du guide relatif aux grands réservoirs verticaux à fond plat sont les bâches PTR<sup>1</sup>. Les matériels entrant dans le périmètre d'application du guide relatif aux échangeurs et réservoirs à fonds bombés sont les matériels du noyau dur appartenant aux circuits auxiliaires. L'exigence de comportement associée à la robustesse sous séisme SND, commune à ces matériels, est le maintien de leur étanchéité et de leur capacité fonctionnelle<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Bâches PTR : réservoirs du système de traitement et refroidissement d'eau des piscines

<sup>2</sup> Capacité fonctionnelle : conservation du débit du fluide traversant le matériel (échangeurs) ou du débit fourni aux circuits connectés (réservoirs)

Afin de justifier le comportement de ces matériels pour le séisme SND, EDF propose une **démarche progressive** qui, à l'issue d'une analyse préliminaire visant à quantifier l'augmentation du chargement sismique, met en œuvre une analyse simplifiée, suivie si nécessaire d'une analyse détaillée. Des renforcements ou des modifications sont envisagés lorsque la robustesse du matériel ne peut pas être démontrée à l'issue des analyses simplifiée et détaillée. Les analyses mises en œuvre dans cette démarche concernent le matériel lui-même et ses ancrages.

**La démarche en différentes étapes envisagée par EDF n'appelle pas de remarque particulière de la part de l'IRSN et répond à l'aspect gradué de la prescription [ECS-ND9] de l'ASN.**

Cependant, EDF effectue ses analyses en utilisant des critères de dimensionnement correspondant à des situations accidentelles (critères de niveau D du code RCC-M<sup>3</sup>), les situations extrêmes affectant les matériels existants du noyau dur étant, selon EDF, des situations « *au-delà du dimensionnement* ». Pour ces situations, EDF considère que la vérification des critères de niveau D du code RCC-M, complétée, dans le cas des bâches PTR, par la vérification de l'absence de risque de flambage, est suffisante pour démontrer le maintien de la capacité fonctionnelle des matériels.

Or, les matériels existants appartenant au noyau dur doivent assurer leur fonction après le séisme avec un haut niveau de fiabilité, y compris en cas de répliques sismiques. Ainsi, l'IRSN considère que les critères pris en compte dans l'analyse doivent être tels que le comportement des matériels existants du noyau dur demeure dans le domaine élastique, quelles que soient les exigences fonctionnelles requises. Ceci n'est pas le cas des critères proposés par EDF, qui autorisent des déformations plastiques dont le cumul pourrait in fine provoquer des inétanchéités dans les zones où elles apparaissent. A fortiori, l'étanchéité ne peut pas être garantie en cas de répliques sismiques intervenant sur un matériel présentant déjà des déformations plastiques générées par un séisme SND. Ce point fait l'objet de la **recommandation n°9** présentée en annexe 1.

Dans le cas où une analyse détaillée est nécessaire pour justifier le comportement d'un matériel, EDF fait appel à des sources de marge et à des méthodes diverses, qui sont liées aux éléments disponibles dans le dossier de dimensionnement du matériel considéré.

L'IRSN considère que certaines approches proposées par EDF entrent dans le cadre des « *méthodes déterministes réalistes* » conformes aux prescriptions de l'ASN. **En revanche, et conformément à la recommandation n°3 présentée en annexe 1, l'IRSN estime que le recours éventuel à un coefficient de ductilité sur la structure de supportage des matériels doit rester limité et être justifié, le cas échéant, au cas par cas.**

Enfin, à l'identique de la remarque formulée pour les ouvrages de génie civil, **l'IRSN estime que la pertinence de la démarche ne pourra être appréciée qu'à la lumière de son application à des matériels sensibles, tels que les bâches PTR.**

---

<sup>3</sup> RCC-M : règles de conception et de construction des matériels mécaniques des îlots nucléaires REP

En conclusion de son évaluation concernant la justification du comportement des ouvrages de génie civil, des grands réservoirs verticaux à fond plat, des échangeurs et des réservoirs à fonds bombés, l'IRSN considère que les éléments méthodologiques présentés par EDF sont acceptables dans leur principe, sous réserve de la prise en compte des recommandations présentées en annexe 1, visant à obtenir une meilleure confiance dans la démonstration de la fonctionnalité des SSC en cas de SND. En outre, il conviendrait que leur application fasse l'objet d'une évaluation sur les SSC les plus sensibles.

Pour le Directeur général et par délégation,

Frédérique PICHEREAU

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté

Annexe 1 à l'Avis IRSN/2017-00118 du 31 mars 2017

Recommandations

Recommandation n° 1 :

L'IRSN recommande qu'EDF réalise une évaluation du comportement, en cas de SND, des ouvrages de génie civil qui sont des SSC du noyau dur, selon des méthodes utilisées lors des réexamens de sûreté des installations et qu'il établisse un état des écarts issus de l'application de ce référentiel, en préalable de l'application d'autres méthodes.

Recommandation n° 2 :

Dans le cadre de l'évaluation du comportement des enceintes de confinement ainsi que des piscines du BK et du BR vis-à-vis du SND, l'IRSN recommande qu'EDF applique les méthodes du référentiel de dimensionnement des INB pour démontrer la maîtrise des déformations des ouvrages en regard des exigences qui leur sont attribuées.

Recommandation n° 3 :

L'IRSN recommande qu'EDF privilégie des justifications du comportement des ancrages et des assemblages des éléments de structures qui ne font pas appel à des coefficients de ductilité. En cas d'utilisation de coefficients de ductilité dans les dossiers de justification des SSC du noyau dur vis-à-vis du SND, EDF présentera, au cas par cas, les limites de l'endommagement pris en compte et justifiera que celui-ci n'est pas préjudiciable au comportement des structures.

Recommandation n° 4 :

L'IRSN recommande qu'EDF apporte, dans les dossiers de justification des SSC du noyau dur, la démonstration de la capacité des ouvrages de génie civil à assurer les fonctions requises postérieurement à un SND, dans les situations où peuvent survenir des répliques sismiques.

Recommandation n° 5 :

L'IRSN recommande que, pour démontrer la fonctionnalité du noyau dur, EDF justifie, dans les dossiers d'études des SSC du noyau dur, le caractère enveloppe des chargements d'accompagnement, notamment des charges variables, à combiner avec les actions extrêmes considérées.

Recommandation n° 6 :

L'IRSN recommande que, pour démontrer la fonctionnalité du noyau dur, EDF justifie, dans les dossiers d'études des SSC du noyau dur, le caractère enveloppe de la réduction par un coefficient 2 du module d'Young du béton des planchers, poteaux et poutres pour évaluer le comportement des structures de génie civil.

**Recommandation n° 7 :**

L'IRSN recommande que, pour démontrer la fonctionnalité du noyau dur, EDF retienne, dans les dossiers d'études des SSC du noyau dur, les valeurs d'amortissement préconisées par le guide ASN 2/01. Dans le cas contraire, EDF devra justifier le caractère réaliste des valeurs d'amortissement supérieures retenues pour évaluer le comportement des structures de génie civil.

**Recommandation n° 8 :**

L'IRSN recommande qu'EDF justifie le recours à la ductilité des ouvrages dans ses vérifications, en intégrant à celles-ci les effets défavorables de l'endommagement correspondant, en particulier les risques d'instabilité locale (flambement, déversement, voilement...) et de fragilité des ouvrages notamment dans le cas de renforcements existants.

**Recommandation n° 9 :**

L'IRSN recommande qu'EDF privilégie l'utilisation de critères de dimensionnement garantissant le comportement élastique des structures pour la justification des grands réservoirs verticaux à fond plat, des échangeurs et des réservoirs à fonds bombés existants appartenant au noyau dur. L'utilisation de critères autorisant des déformations irréversibles devra être réservée aux cas où le comportement élastique ne pourrait pas être garanti et où des renforcements ne seraient pas envisageables ; pour ces cas, EDF devra justifier que l'étendue et le cumul des déformations irréversibles sont tels que la fonctionnalité des matériels est respectée, y compris en cas de réplique sismique.

Annexe 2 à l'Avis IRSN/2017-00118 du 31 mars 2017

Observation

L'IRSN considère que le recours à des analyses complémentaires mettant en œuvre des calculs de structures non-linéaires (push-over, transitoire non-linéaire) sort du cadre de la méthodologie prescrite par l'ASN et qu'il devra rester très limité et justifié au cas par cas.