



**Avis n° 2024-AV-0456 de l’Autorité de sûreté nucléaire du 26 novembre 2024  
suite aux recommandations de recherche de son comité scientifique relatif  
à l’identification de sujets de recherche à approfondir sur le vieillissement  
des composants métalliques non ou difficilement remplaçables des réacteurs  
à eau sous pression en vue de leur fonctionnement au-delà de 60 ans**

L’Autorité de sûreté nucléaire,

Vu le code de l’environnement, notamment son article L. 592-31-1 ;

Vu l’avis du comité scientifique de l’ASN en date du 17 avril 2024 ;

Vu les précédents avis de l’ASN relatifs à l’identification de sujets de recherche à approfondir en dates du 10 avril 2012 (avis n°2012-AV-0147), du 8 janvier 2015 (avis n°2015-AV-0226), du 4 mai 2018 (avis n°2018-AV-0306) et du 14 mars 2023 (avis n°2023-AV-0417) ;

Considérant ce qui suit :

- Les propositions et recommandations des avis du 10 avril 2012, du 8 janvier 2015, du 4 mai 2018 et du 14 mars 2023 susvisés doivent être complétées en ce qui concerne le vieillissement des composants métalliques, en particulier de la cuve, des structures internes de cuve et des coudes « E » du circuit primaire principal des réacteurs électronucléaires à eau sous pression (REP) ainsi que les techniques de contrôle non destructif qui leur sont associées ;
- La démarche de maîtrise du vieillissement des structures, systèmes et composants des réacteurs électronucléaires mise en place par EDF au moyen de processus opérationnels de suivi, de programmes d’investigation complémentaire et de programmes de recherche, rappelés dans l’avis du 14 mars 2023 susvisé, s’applique également aux composants non ou difficilement remplaçables considérés dans le présent avis ;
- Suite à l’intention exprimée par EDF de poursuivre le fonctionnement de ses réacteurs actuels jusqu’à 60 ans et au-delà au travers de sa feuille de route stratégique qui détaille le programme de travail à mener, l’ASN a demandé à EDF, dans son avis n°2023-AV-0420 du 13 juin 2023, d’étayer les hypothèses de durée de fonctionnement des réacteurs jusqu’à 60 ans et au-delà d’éléments techniques robustes du point de vue de la sûreté nucléaire sur lesquels elle s’appuiera pour établir sa prise de position sur le sujet à la fin de l’année 2026 ;
- Le présent avis a été établi afin que soient menés des programmes scientifiques de recherche en complément des travaux engagés dans la démarche précitée sur le vieillissement des réacteurs électronucléaires du parc français en vue d’une éventuelle poursuite de leur fonctionnement jusqu’à 60 ans et au-delà ;

- Le présent avis pourra nourrir la stratégie programmatique que l'ASNR, qui aura une activité importante de recherche, devra élaborer dans le futur,

**Rappelle que :**

- La cuve, les coudes « E » du circuit primaire principal et les structures des internes de cuve sont des composants non ou difficilement remplaçables importants pour la sûreté des réacteurs électronucléaires ; les matériaux métalliques qui les constituent sont soumis à des phénomènes de dégradation induits par les conditions d'exploitation (irradiation neutronique, forte pression et hautes températures) qu'il est nécessaire de caractériser et de quantifier ;
- La sûreté de l'exploitation des réacteurs repose sur l'intégrité de ces composants et la poursuite de fonctionnement des réacteurs électronucléaires nécessite de justifier le maintien de cette intégrité pendant toute la durée de leur utilisation ;
- Cette justification doit s'appuyer sur plusieurs piliers : une connaissance des propriétés mécaniques des matériaux à l'état de recette et à l'état vieilli qui tient compte de toutes les incertitudes connues, des contrôles non destructifs périodiques permettant de détecter au plus tôt d'éventuels défauts préjudiciables, le maintien des chargements dans les hypothèses de la démonstration de sûreté et enfin des méthodes de calcul mécanique scientifiquement robustes ;
- Ces piliers doivent être mobilisés dans des analyses de sûreté prudentes intégrant des marges, afin de limiter le risque d'accident autant que raisonnablement possible ;
- Les travaux de recherche et de développement en cours et à mener doivent concourir à l'amélioration des connaissances de ces piliers et à réduire les incertitudes quand cela est possible. Ils doivent être réalisés dans le but de permettre la mobilisation de ces connaissances dans la démonstration de sûreté en garantissant son conservatisme.

**1. Concernant la cuve, l'ASN :**

**Rappelle que :**

- La rupture de la cuve n'est pas considérée dans la démonstration de sûreté d'un REP car aucune disposition raisonnable de limitation des conséquences de cette rupture, en tant qu'événement déclencheur, ne pourrait être définie ;
- Le principal mécanisme de vieillissement auquel est soumis l'acier de cuve lors de l'exploitation est la fragilisation induite par le flux neutronique, en particulier au niveau de la zone de cœur où le flux est le plus important. Cette fragilisation se traduit par une diminution de sa ténacité, c'est-à-dire de sa résistance à la rupture brutale ;
- Le programme de surveillance des effets de l'irradiation (PSI) mis en place par EDF au niveau des cuves permet un suivi et une anticipation de la fragilisation des matériaux de la zone de cœur, au travers de la réalisation d'essais mécaniques sur des échantillons de matériau issus de la fabrication des cuves et soumis à l'irradiation du cœur.

**Note que :**

- La formule de fragilisation sous irradiation actuellement employée dans les calculs relatifs à la durée de vie des cuves est une formule empirique qui repose sur des essais mécaniques et sa validité est examinée régulièrement au vu des résultats obtenus dans le cadre du PSI ;
- Les éprouvettes examinées dans le cadre du PSI ne permettent d'effectuer qu'une quantité limitée d'essais, constitués majoritairement d'essais de résilience qui ne rendent qu'indirectement compte de la ténacité des matériaux ;

- Les mesures expérimentales de la ténacité présentent une dispersion importante qui est due en partie aux hétérogénéités de composition chimique et de structure au sein des pièces forgées, qui sont inhérentes aux matériaux et aux procédés de fabrication utilisés.

**Recommande de :**

- Poursuivre les recherches sur les procédés d'essai mécaniques, par exemple sur le recours à des éprouvettes de dimension plus faible, afin d'augmenter le nombre de mesures expérimentales réalisées à partir des éprouvettes du PSI et de pouvoir mesurer directement la ténacité des aciers de cuve irradiés, en tenant compte des effets potentiels d'un changement d'échelle des éprouvettes sur l'interprétation des résultats d'essai ;
- Mener des recherches sur l'origine et la compréhension de la dispersion des résultats des essais de ténacité en étudiant les effets relevant de la composition chimique, de la microstructure, des hétérogénéités de la matière issus des procédés de fabrication, etc. ;
- Etudier les matériaux à des niveaux de fluence susceptibles d'être atteints à 60 ans et au-delà afin de consolider les lois de prédiction de la cinétique de fragilisation des aciers de cuve irradiés ;
- Poursuivre les recherches sur la modélisation multi-échelle couplée à des mesures expérimentales afin de progresser dans la connaissance des mécanismes à l'origine de la fragilisation des aciers induite par irradiation.

**2. Concernant les internes de cuve, l'ASN :**

**Rappelle que :**

- Les structures internes de cuve subissent un taux d'irradiation supérieur de deux ordres de grandeur à celui de la cuve. Ces structures sont remplaçables, mais leur remplacement est techniquement difficile, en particulier pour des raisons de radioprotection.
- Les structures internes de cuve sont susceptibles d'être endommagées par les phénomènes de corrosion sous contrainte assistée par l'irradiation (IASCC), de fluage, de durcissement et de gonflement.

**Constate que :**

- EDF mène depuis plusieurs années des programmes de recherche sur le vieillissement des internes de cuve. Par ailleurs les programmes internationaux incluant notamment le CEA, EDF et Framatome en cours permettront d'améliorer les connaissances sur les mécanismes de dégradation des matériaux des structures des internes de cuve due à l'irradiation. Ces programmes sont adaptés et cohérents avec les enjeux et les calendriers ;
- Les recherches menées sur les phénomènes de gonflement dans les matériaux constituant les structures des internes de cuve, en particulier dans le cadre du programme Gondole, ne couvrent pas les taux d'irradiation pouvant être atteints au-delà de 60 ans de fonctionnement.

**Recommande de :**

- Poursuivre les recherches sur les phénomènes de gonflement des internes de cuve avec l'objectif d'évaluer des comportements représentatifs d'une durée de fonctionnement supérieure à 60 ans.

### **3. Concernant les coudes E, l'ASN :**

#### **Rappelle que :**

- Les coudes du circuit primaire des réacteurs sont fabriqués par moulage statique à partir d'un acier inoxydable austéno-ferritique. Leur résistance en service est affectée par deux phénomènes majeurs : la présence potentielle de défauts inhérents au procédé de fabrication employé (retassures, criques de solidification) qui sont susceptibles de fragiliser localement le matériau et le vieillissement thermique de l'acier qui induit une diminution de sa ténacité ;
- Les coudes E sont particulièrement difficiles à remplacer par rapport aux autres composants moulés en acier austéno-ferritiques du circuit primaire des réacteurs en raison de leur emplacement et des problématiques de radioprotection associées ;
- La justification du maintien en service des coudes E s'appuie sur une analyse du risque de rupture brutale considérant les situations les plus pénalisantes, en tenant compte du vieillissement thermique et en postulant la présence d'un défaut de référence de type plan, présentant une nocivité enveloppe des défauts redoutés dans les coudes ;

#### **Constata que :**

- Les méthodes de démonstration actuelles ne permettent pas de justifier la poursuite d'exploitation de coudes E installés sur certains réacteurs au-delà de 50 ou 60 ans. En conséquence, EDF a engagé des actions de R&D telles que l'acquisition et l'analyse de nouvelles données expérimentales, la mobilisation de nouvelles méthodes d'analyse mécanique et le développement de nouveaux procédés de contrôle en service ainsi que des travaux de modélisation afin d'améliorer la prévision de la résistance à la déchirure ductile ;

#### **Recommande de :**

- Poursuivre les recherches sur la nocivité des défauts de fonderie susceptibles d'être rencontrés dans les produits moulés austéno-ferritiques ainsi que sur les mécanismes d'interaction entre eux, en s'appuyant sur des mesures expérimentales représentatives de la situation des coudes exploités sur le parc ;
- Mener des programmes expérimentaux afin d'étayer la possibilité de mettre en œuvre des méthodes de calcul élasto-plastiques plus avancées pour justifier le maintien en exploitation de ces coudes E.

### **4. Dans le domaine des contrôles non destructifs, l'ASN :**

#### **Rappelle que :**

- Les contrôles non destructifs sont un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité des structures ou de matériaux sans les dégrader en sortie de fabrication ou en phase d'exploitation. Ces outils permettent de surveiller les équipements et installations et d'anticiper les anomalies pouvant conduire à des défaillances des composants importants pour la sûreté ;

#### **Constata que :**

- La capacité à détecter des défauts susceptibles de porter préjudice à l'intégrité des composants est un enjeu de la poursuite de fonctionnement des réacteurs électronucléaires en raison de la fragilisation des matériaux liée aux phénomènes de vieillissement ;

**Recommande de :**

- Poursuivre les développements visant à améliorer les outils de détection des défauts ;
- Poursuivre le développement d'outils numériques de simulation et d'analyse des données notamment par l'apprentissage automatique et l'intelligence artificielle afin d'aider au bon diagnostic et à la prise de décision, de discriminer un artefact d'un défaut en milieu complexe, etc. ;
- Développer des systèmes automatisés d'acquisition et d'enregistrements des données issues des contrôles effectués sur les composants et les outils numériques associés à leur traitement afin de constituer des bases de données de défauts réels comparatives avec des installations similaires ;
- Poursuivre le développement d'outils numériques de réalité augmentée, qui sont une aide efficace aux opérateurs lors de la réalisation des contrôles sur les composants.

**D'une manière générale, l'ASN recommande de :**

- Renforcer les collaborations nationales et internationales entre EDF et les acteurs de la recherche, notamment par le partage de bases de données, la mutualisation d'outils et de plateformes ;
- Travailler au maintien des compétences scientifiques et techniques ainsi qu'à la transmission du savoir (formation école / université) ;
- S'assurer de la disponibilité et de l'accès à des installations de recherche en France et à l'étranger permettant de simuler les conditions en réacteur, en particulier les instruments d'irradiation aux neutrons qui permettront de soutenir les études de R&D nécessaires à la poursuite de l'exploitation des REP jusqu'à 60 ans et au-delà.

Fait à Montrouge, le 26 novembre 2024.

Le collège de l'Autorité de sûreté nucléaire\*,

Signé par :

Pierre-Marie ABADIE

Olivier DUBOIS

Stéphanie GUÉNOT BRESSON

Jean-Luc LACHAUME

\* Commissaires présents en séance.