

Fontenay-aux-Roses, le 20 juin 2022

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

## AVIS IRSN N° 2022-00127

---

**Objet :** Réacteurs électronucléaires EDF - Tous paliers  
Retour d'expérience du comportement du combustible et des grappes sur la période 2010 – 2019

---

**Réf. :** Saisine ASN - CODEP-DCN-2022-007854 du 8 mars 2022

---

Conformément à la demande formulée par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) en référence, l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) a examiné le retour d'expérience tiré par EDF de l'exploitation et de la fabrication des produits combustibles nucléaires pour la période allant de 2010 à 2019.

### 1. CONTEXTE

La prise en compte par les exploitants d'installations nucléaires du retour d'expérience (REX), tant national qu'international, est un élément important du processus d'amélioration continue de la sûreté. EDF bénéficie à ce titre d'un REX significatif d'exploitation de divers types de produits combustibles fabriqués par deux concepteurs (Framatome et Westinghouse) et irradiés dans les cœurs des 56<sup>1</sup> réacteurs à eau pressurisée (REP) actuellement en exploitation en France, composé de trois paliers de réacteurs standardisés (900 MWe, 1300 MWe et 1450 MWe dit N4). Il convient donc de dresser périodiquement un bilan du comportement des assemblages de combustible et des grappes, afin d'en tirer des enseignements visant à améliorer la sûreté.

Le REX, concernant ici la période allant de 2010 à 2019, a en particulier porté sur :

- *« l'utilisation des assemblages de combustible et des grappes dans les réacteurs exploités par EDF avec les différents produits utilisés, les évolutions de conception et de fabrication et les conditions de mise en œuvre des assemblages de combustible ;*
- *les programmes d'irradiation des assemblages de combustible expérimentaux et des grappes expérimentales en réacteur ;*
- *les écarts rencontrés lors de la fabrication des assemblages de combustible ;*
- *le comportement du combustible en exploitation vis-à-vis du relâchement des gaz de fission, de la corrosion des gaines, du grandissement des assemblages et des crayons ;*
- *les pertes d'étanchéité de la première barrière ;*

---

<sup>1</sup> Sur la période allant de 2010 à 2019, 58 réacteurs étaient exploités par EDF.

- *les autres évènements ayant porté atteinte aux assemblages sans conduire à la perte de leur étanchéité, telles que les déformations des assemblages ou les incidents de manutention ;*
- *l'impact des pertes d'étanchéité de la première barrière sur l'activité du fluide primaire et ses conséquences en exploitation sur la dosimétrie, les rejets et les déchets ;*
- *le comportement des grappes : les évènements rencontrés et les stratégies de surveillance et de maintenance des grappes ;*
- *l'état de l'exploitation effective du combustible par rapport à ses limites d'utilisation définies dans la démonstration de sûreté ».*

Dans ce contexte, par la lettre citée en référence, l'ASN souhaite recueillir l'avis de l'IRSN sur le REX tiré par EDF de la période allant de 2010 à 2019 concernant :

- *« le comportement du combustible et des grappes en exploitation sur les réacteurs exploités par EDF ;*
- *la pertinence des évolutions apportées au combustible et aux grappes à la conception ou en fabrication ;*
- *la prise en compte par l'exploitant des enseignements tirés du retour d'expérience des évènements survenus et la suffisance des actions et mesures d'exploitation prises par EDF pour résorber les dysfonctionnements ;*
- *l'adéquation et la suffisance des programmes de surveillance, d'expérimentation et de recherche et développement vis-à-vis des problèmes soulevés par le comportement du combustible et des grappes en exploitation ».*

Dans la suite de l'avis, l'IRSN présente les conclusions de son expertise afin de répondre aux questionnements de l'ASN susmentionnés.

Si le REX présenté par EDF est limité à la période allant de 2010 à 2019, l'IRSN a intégré à son analyse les évènements survenus au-delà de 2019 jugés pertinents à titre d'éclairage et pour dresser un bilan à date du comportement des produits combustibles irradiés dans les réacteurs d'EDF.

## **2. ÉVOLUTIONS DES GESTIONS DE COMBUSTIBLE, DES ASSEMBLAGES DE COMBUSTIBLE ET DES GRAPPES**

Les motivations d'EDF en matière de gestion de la composition des cœurs des réacteurs et des produits combustibles sont structurées par les enjeux suivants :

- améliorer la fiabilité et les performances en exploitation, ce qui se traduit par le développement et la mise en œuvre d'innovations de produits combustibles ;
- prendre en compte les évolutions du référentiel de sûreté<sup>2</sup> qui peuvent affecter les marges de conception ou d'exploitation. Les évolutions des produits combustibles doivent alors contribuer à la sécurisation ou à la restauration de marges ;
- maîtriser la cohérence du cycle du combustible en recyclant des volumes de combustible issu du retraitement pour produire du combustible MOX (*mixed oxide* pour mélange d'oxydes mixtes d'uranium et de plutonium) et du combustible URE (uranium de retraitement enrichi). Cela nécessite le maintien du déploiement de produits combustibles utilisant des matières nucléaires issues du traitement des combustibles UNE (uranium naturel enrichi) usés ;
- garantir la sécurité d'approvisionnement des produits combustibles en visant une diversification des fournisseurs ;

---

<sup>2</sup> Évolutions liées à la mise en œuvre de nouveaux critères ou à des évolutions de critères, aux réexamens périodiques des installations nucléaires...

- intégrer le REX acquis en fabrication et en exploitation en France et à l'international afin d'éclairer ses choix en termes d'évolutions de produits combustibles.

La période allant de 2010 à 2019 a été marquée par des évolutions de la composition des cœurs des réacteurs, à savoir :

- la mise en œuvre d'une variabilité des recharges étendue afin de gérer les événements courants d'exploitation, d'optimiser les arrêts de réacteurs, de renouveler les assemblages de combustible en réserve de gestion et d'accommoder les difficultés de fabrication des produits combustibles. Cette variabilité se caractérise par des fluctuations des caractéristiques générales des recharges standard prévues initialement, en adaptant notamment la proportion d'assemblages de combustible UO<sub>2</sub> ou MOX neufs ;
- l'introduction, dans le cadre du quatrième réexamen périodique des réacteurs, de grappes absorbantes fixes en hafnium pour limiter le flux neutronique sur les secteurs les plus exposés de la cuve et ainsi contribuer à prolonger sa durée de vie ;
- pour les réacteurs du centre nucléaire de production d'électricité (CNPE) de Cruas, la suspension du recyclage de l'URT (uranium obtenu par le traitement du combustible utilisé après son utilisation en réacteur), qui a conduit au retour à l'utilisation de combustible UNE uniquement ;
- l'augmentation de la teneur moyenne maximale en plutonium des assemblages de combustible MOX pour maintenir l'équivalence énergétique de ce combustible avec le combustible UO<sub>2</sub> enrichi à 3,7 % ;
- la mise en œuvre puis l'abandon de la gestion de combustible GALICE (à haut taux de combustion) sur le réacteur n° 2 du CNPE de Nogent ;
- l'arrêt des réacteurs du CNPE de Fessenheim, nécessitant des adaptations des derniers cœurs ;
- l'introduction à titre expérimental de divers assemblages précurseurs en réacteur (voir paragraphe 6), en amont d'une qualification d'une nouvelle conception et d'une éventuelle généralisation.

Ces différentes évolutions ont fait l'objet d'expertises de l'IRSN et ont été jugées acceptables dans le cadre d'avis dédiés.

De plus, des évolutions de conception et de fabrication des produits combustibles (voir paragraphe 3) ont été déployées dans les réacteurs d'EDF sur la période allant de 2010 à 2019 en lien avec les motivations d'EDF susmentionnées.

Par ailleurs, des évolutions de la chimie du circuit primaire ont été mises en œuvre sur la période allant de 2010 à 2019 afin de limiter la contamination du fluide primaire par les produits de corrosion issus du circuit primaire pouvant se déposer sur les composants de la cuve des réacteurs et sur les assemblages de combustible. Le REX ne révèle pas d'effet sur la cinétique de corrosion de la gaine des crayons de combustible, **ce qui est satisfaisant**.

Enfin, le dialogue et la volonté de progresser de façon commune entre EDF, ses homologues internationaux et ses fournisseurs contribuent à apporter des solutions à des difficultés rencontrées en fabrication et en exploitation. Toutefois, l'IRSN souligne que plusieurs événements anormaux, évoqués au paragraphe 4, auraient pu être anticipés ou évités compte tenu du REX acquis à l'international et de son analyse. De plus, certaines améliorations de conception d'assemblage de combustible ont été mises en œuvre de manière tardive en France alors qu'elles étaient déjà déployées à l'international pour résoudre certaines anomalies. **L'IRSN estime ainsi qu'EDF doit mieux analyser et prendre en compte le REX disponible à l'international sur le comportement des produits combustibles afin de bénéficier des meilleures conceptions, techniques de fabrication et dispositions en exploitation, et ce pour *in fine* éviter l'occurrence d'événements indésirables en France.** À cet égard, EDF s'est engagé dans le cadre de la présente expertise à davantage prendre en compte le REX et les signaux faibles en France et à l'international pour *in fine* mieux anticiper les anomalies de comportement en exploitation des

produits combustibles pouvant affecter les réacteurs du parc en exploitation d'EDF et identifier leurs parades. **L'IRSN estime cet engagement satisfaisant.**

### 3. FABRICATION DES PRODUITS COMBUSTIBLES

L'IRSN note que l'organisation de la fabrication des produits combustibles mise en place par chaque fournisseur et par EDF suit les préconisations formalisées dans les règles de conception et de construction applicables aux assemblages de combustible des centrales nucléaires REP (RCC-C) éditées par l'AFCEM (association française pour les règles de conception, de construction et de surveillance en exploitation des matériels des chaudières électronucléaires), **ce qui est satisfaisant.**

Concernant l'organisation de la fabrication des produits combustibles, le tissu industriel des deux fournisseurs bénéficie d'un REX significatif acquis sur de nombreuses années.

Sur la période allant de 2010 à 2019, dans le cadre de projets d'amélioration, certaines usines ont bénéficié d'évolutions visant à fiabiliser leur activité ou à augmenter leur capacité de production. D'autres usines ont cependant stoppé leur activité qui a été transférée avec ou sans évolution du procédé vers d'autres sites. En particulier, la fermeture en 2012 de l'atelier de fabrication de la poudre UO<sub>2</sub> appauvri de l'usine de Pierrelatte, qui utilisait un procédé d'élaboration de l'UO<sub>2</sub> par « voie humide », a conduit l'usine de Melox d'ORANO à s'approvisionner en poudre UO<sub>2</sub> provenant de l'usine de Lingen, pour la fabrication du combustible MOX, basée sur un procédé de conversion par « voie sèche », ce qui a *in fine* entraîné des difficultés de fabrication.

Concernant les évolutions des procédés de fabrication des produits combustibles, elles peuvent être liées à l'outil industriel ou aux spécifications techniques des produits combustibles existants.

La période allant de 2010 à 2019 a été marquée par plusieurs évolutions des procédés liées à l'outil industriel dont les plus notables sont :

- la lubrification à l'eau des crayons de combustible avant leur insertion dans le squelette de l'assemblage pour prévenir l'apparition de petits percements précoces du gainage M5 de conception Framatome ;
- la mise en œuvre du processus de soudage par ultrason pour prévenir les pertes d'étanchéité au niveau des bouchons des crayons de combustible à gainage M5 ;
- la mise en place du procédé spécifique de traitement thermique pour renforcer la robustesse de la grille de maintien (dite *P-Grid*) située en partie basse des assemblages de combustible de conception Westinghouse ;
- la mise en œuvre du procédé de recuit final à basse température des ressorts de grilles des assemblages de combustible de conception Framatome pour limiter le risque de rupture par corrosion sous contrainte.

Par ailleurs, sur la période allant de 2010 à 2019, des modifications liées aux spécifications techniques ont été apportées. Elles concernent notamment :

- l'introduction du gainage ZIRLO Optimisé pour améliorer la résistance à la corrosion des crayons de combustible de conception Westinghouse ;
- l'introduction d'un alliage quaternaire<sup>3</sup> en tant que matériau de structure des assemblages de combustible de conception Framatome pour mieux résister à la déformation latérale des assemblages ;
- la modification de la cale en partie basse des crayons de combustible MOX pour limiter les conséquences des anomalies de fabrication et de conception affectant ce combustible.

<sup>3</sup> L'alliage quaternaire à base de zirconium est composé de quatre éléments (zirconium, étain, fer et niobium).

Concernant la surveillance des fournisseurs des produits combustibles, EDF a mis en œuvre des dispositions de surveillance contractuelles avec les fournisseurs afin d'assurer la stabilité des procédés de production et la conformité des produits.

Sur la période allant de 2010 à 2019, la surveillance exercée par EDF sur ses fournisseurs a permis de mettre en exergue un nombre significatif d'évènements anormaux affectant la qualité de la fabrication des produits combustibles, en plus de ceux que les fournisseurs ont eux-mêmes identifiés. **Nonobstant cette surveillance, l'IRSN considère qu'EDF doit poursuivre la sensibilisation de ses fournisseurs afin d'améliorer la qualité de fabrication des produits combustibles.**

Concernant les incidents de fabrication des produits combustibles, des actions correctives ont été systématiquement mises en œuvre pour remédier aux évènements anormaux, **ce qui est satisfaisant dans le principe.**

Sur la période allant de 2010 à 2019, le nombre d'évènements anormaux est resté globalement stable par rapport à la période allant de 2003 à 2009, quel que soit le fournisseur, à l'exception toutefois du combustible MOX fabriqué par Framatome. En effet, l'usine de Melox d'ORANO rencontre des difficultés importantes de fabrication du combustible MOX depuis 2013. En particulier, des non-conformités en lien avec la présence d'îlots plutonifères de grande taille dépassant certains critères des spécifications de fabrication ont été observées dans les pastilles de combustible MOX malgré le déploiement d'actions correctives. La qualification d'un nouveau procédé permettant la fabrication du combustible MOX conforme aux spécifications, notamment via le procédé d'élaboration de l'UO<sub>2</sub> par « voie humide », a été initiée en 2021 et se poursuit en 2022. Par ailleurs, l'usine de Melox a engagé début 2022 un plan d'actions majeures de remise à niveau. **L'effet de ces actions devra être confirmé par le REX.**

## 4. EXPLOITATION DES CŒURS DES RÉACTEURS

Le REX d'exploitation permet à EDF d'identifier des besoins d'évolution des gestions et des produits combustibles. L'analyse menée sur la période allant de 2003 à 2009 a conclu notamment que les pertes d'étanchéité de la première barrière et la déformation latérale des assemblages de combustible étaient deux sujets d'importance sur lesquels EDF devait rester vigilant.

Concernant les pertes d'étanchéité de la première barrière, la période allant de 2010 à 2019 a été marquée par une baisse significative du taux de défaillance du combustible (nombre d'assemblages non étanches parmi les assemblages déchargés) pour les deux fournisseurs par rapport à la période précédente, **ce qui est satisfaisant.** Les principales causes de perte d'étanchéité identifiées sur la période allant de 2010 à 2019 ont été :

- la présence de corps migrants d'origine exogène dans le circuit primaire (c'est-à-dire introduits dans le circuit primaire de manière fortuite) ;
- la fissuration des ressorts de grilles des assemblages de combustible de conception Framatome ;
- l'usure vibratoire de la gaine (dit *fretting*) pour les assemblages de combustible de conception Westinghouse ;
- les opérations d'insertion des crayons à gainage M5 dans les grilles des assemblages de combustible de conception Framatome qui peuvent générer des copeaux de gaine dans le circuit primaire.

**Les différentes causes de pertes d'étanchéité de la première barrière ont toutes fait l'objet d'un traitement correctif, en déployant des évolutions de conception et de fabrication ou en mettant en œuvre des dispositions d'exploitation, ce qui est satisfaisant. De plus, l'IRSN estime satisfaisante la démarche de justification de la sûreté de l'exploitation des réacteurs concernés par la présence de corps migrants.**

Par ailleurs, l'IRSN note que, en France, un phénomène de dépôt de corrosion de type CRUD<sup>4</sup> sur les gaines des crayons de combustible a conduit à des pertes d'étanchéité de la première barrière. Cet évènement, constaté à l'issue du cycle 23 du réacteur n° 2 du CNPE de Paluel, a conduit à la mise en place de conditions particulières d'exploitation afin de redémarrer le réacteur début 2020. Il a fait l'objet d'un avis de l'IRSN. **L'IRSN estime qu'EDF doit rester vigilant sur ce sujet.**

Concernant l'impact des pertes d'étanchéité de la première barrière, au regard du REX sur la période allant de 2010 à 2019, les valeurs limites des spécifications radiochimiques ont été respectées, hormis pour le cas du réacteur n° 3 du CNPE de Paluel en 2012 qui a fait l'objet d'une justification spécifique. Par ailleurs, l'IRSN estime que les nouvelles valeurs limites des spécifications radiochimiques, plus contraignantes, sont fixées de manière pertinente au regard de la sûreté. Par ailleurs, pour la période de REX considérée, l'activité du fluide primaire n'a pas engendré d'augmentation significative des rejets sous forme gazeuse ou liquide, **ce qui est satisfaisant. Enfin, il n'a pas été observé de corrélation entre la production de déchets et la dosimétrie collective reçue lors des arrêts de réacteur, et la présence de pertes d'étanchéité de la première barrière. En tout état de cause, l'IRSN souligne l'importance de préserver l'intégrité de la première barrière afin notamment d'éviter tout relâchement de radionucléides dans le fluide primaire.**

Concernant les défaillances du combustible sans perte d'étanchéité de la première barrière, les principales causes identifiées sur la période allant de 2010 à 2019 ont été :

- la déformation latérale des assemblages de combustible : si les réacteurs des paliers 900 MWe et 1300 MWe ont présenté un comportement globalement satisfaisant qui s'est traduit par des résultats d'essais de temps de chute de grappes de commande<sup>5</sup> respectant les critères, les réacteurs du palier N4 ont rencontré des non-respects de critères de temps de chute de grappes<sup>6</sup> liés à des déformations importantes des assemblages. Ceci a conduit EDF à mettre en œuvre des modifications de conception d'assemblage de combustible<sup>7</sup>, dont certaines sont en cours de généralisation sur tous les réacteurs, ainsi qu'une stratégie d'optimisation des plans de chargement. Un cas particulier concerne le réacteur n° 2 du CNPE de Nogent (1300 MWe), pour lequel la mise en œuvre de la gestion de combustible GALICE (à haut taux de combustion - supérieur à 52 GWj/tU) à partir de 2010 a conduit à des déformations latérales des assemblages excessives. EDF a alors engagé un retour à la gestion de combustible GEMMES (taux de combustion inférieur à 52 GWj/tU). La situation est aujourd'hui globalement stabilisée pour tous les réacteurs du parc d'EDF en exploitation, **ce qui est satisfaisant ;**
- les incidents de manutention des assemblages de combustible : une nette diminution des occurrences a été constatée du fait, d'une part de la généralisation de grilles améliorées de conception Framatome, et d'autre part des évolutions des procédures et des outillages de manutention du combustible, **ce qui est satisfaisant ;**
- l'utilisation du gainage historique Zircaloy-4 (Zy-4) sensible à la corrosion de la gaine en fonctionnement normal : elle a conduit EDF à mettre en œuvre des restrictions d'exploitation et à produire une démonstration de sûreté spécifique. L'arrêt de l'introduction d'assemblages de combustible neufs à gainage Zy-4 depuis 2016 a permis son remplacement progressif par des gainages plus résistants à la corrosion (M5 et ZIRLO Optimisé), **ce qui est satisfaisant.**

<sup>4</sup> CRUD (*Chalk River Unidentified Deposit*) : il s'agit de dépôts constitués principalement de produits de corrosion de fer et de nickel dont l'occurrence a déjà été rencontrée sur plusieurs réacteurs aux États-Unis.

<sup>5</sup> Les essais de temps de chute de grappes sont réalisés afin de vérifier, en particulier après le rechargement du cœur, la disponibilité de l'arrêt automatique du réacteur.

<sup>6</sup> Dans ce cas de figure, EDF a produit un dossier de démonstration spécifique pour justifier l'exploitation en toute sûreté du réacteur concerné.

<sup>7</sup> En particulier, les modifications visent à renforcer la structure de l'assemblage par l'épaississement des tubes-guides ainsi que par le remplacement du matériau constituant ces tubes par un alliage quaternaire plus résistant à la déformation.

Au-delà de la période allant de 2010 à 2019, l'IRSN retient deux évènements récents survenus sur le parc d'EDF en exploitation :

- l'endommagement de la *P-Grid* des assemblages de combustible de conception Westinghouse détecté en 2020 avec la production de débris, évènement qui a été analysé par l'IRSN ;
- l'apparition d'un phénomène de corrosion accélérée de la gaine de certains crayons de combustible en alliage M5 détecté en 2021, qui a concerné les réacteurs du palier N4 et, dans une moindre ampleur, les réacteurs de 1300 MWe et de 900 MWe. Cet évènement a fait l'objet de plusieurs avis de l'IRSN. L'IRSN souligne qu'EDF poursuit actuellement des analyses afin de mieux appréhender les causes de ce phénomène.

**Pour ces deux évènements, EDF met en œuvre des mesures compensatoires afin d'assurer l'exploitation en toute sûreté des réacteurs concernés, ce qui est acceptable à ce stade.**

Concernant les moyens de surveillance du combustible et de détection des pertes d'étanchéité de la première barrière, le REX des évènements récents a révélé la nécessité qu'EDF améliore, d'une part la qualité et le suivi des examens télévisuels réalisés sur les assemblages de combustible, et d'autre part l'organisation mise en place pour l'identification lors du déchargement du cœur des assemblages de combustible potentiellement inétanches. **Sur ces deux aspects, EDF s'est engagé à prendre les dispositions nécessaires, ce qui est satisfaisant sur le principe.**

Concernant le REX d'exploitation relatif aux grappes de commande et aux grappes sources secondaires<sup>8</sup>, la période allant de 2010 à 2019 a été marquée par :

- une diminution importante du nombre de grappes de commande rebutées, résultant d'optimisations successives de la stratégie de maintenance des grappes en appliquant des critères de mise au rebut plus sévères, **ce qui est satisfaisant ;**
- quelques évènements de détachement de crayons de grappes de commande qui ont conduit à une évolution de conception des grappes introduite depuis 2021. **Son effet devra être confirmé par le REX ;**
- une diminution importante du nombre de grappes sources présentant un dépassement de la durée limite de fonctionnement recommandée<sup>9</sup>, résultant de la déclinaison à partir de 2010 d'une nouvelle stratégie de maintenance, **ce qui est satisfaisant.**

Concernant le référentiel d'exploitation des cœurs des réacteurs, certaines situations rencontrées par EDF, résultant notamment de l'indisponibilité ou d'un remplacement de matériel, nécessitent des dérogations aux règles générales d'exploitation applicables. Sur la période allant de 2010 à 2019, plusieurs dérogations ont concerné l'exploitation du cœur et ont ainsi conduit à modifier de manière temporaire les spécifications techniques d'exploitation, les essais périodiques ou les essais physiques du cœur. **Lorsque ces situations sont récurrentes, EDF s'efforce de les intégrer, notamment à l'occasion des réexamens de sûreté, directement dans les référentiels de sûreté, ce qui est satisfaisant sur le principe.**

<sup>8</sup> Les grappes sources secondaires, émettrices de neutrons, sont utilisées pour la surveillance de la population neutronique du cœur dans les états d'arrêt des réacteurs.

<sup>9</sup> En 2020, aucune grappe source ne présente un dépassement de la durée limite de fonctionnement recommandée.

## 5. PROGRAMMES DE SURVEILLANCE DES ASSEMBLAGES DE COMBUSTIBLE

Les examens réalisés notamment sur les assemblages et les crayons de combustible irradiés en réacteur s'inscrivent dans le cadre des programmes de surveillance mis en œuvre par EDF et ses fournisseurs. Ces examens consistent en particulier à réaliser des mesures d'épaisseur d'oxyde de la gaine des crayons de combustible, de relâchement des gaz de fission dans les crayons, de grandissement ou de déformation des composants des assemblages. Ces mesures visent à :

- qualifier un nouveau produit combustible, au cours des différentes phases d'introduction préalables à sa généralisation ;
- confirmer l'amélioration attendue du nouveau produit combustible ;
- enrichir le REX relatif au comportement en exploitation ;
- évaluer l'impact sur le comportement du produit combustible d'une modification des conditions d'exploitation du réacteur.

Les mesures réalisées par EDF sur les réacteurs du parc français ou sur des réacteurs étrangers chargés avec des assemblages de combustible de mêmes conceptions ne révèlent pas de comportement inattendu et s'inscrivent globalement dans la continuité du REX antérieur. Seuls le relâchement des gaz de fission spécifique au combustible MOX et le grandissement de certaines conceptions d'assemblage de combustible présentent des écarts avec le REX, pour lesquels EDF a apporté des justifications satisfaisantes vis-à-vis de la démonstration de sûreté.

**De manière générale, l'IRSN souligne l'importance des programmes de surveillance des assemblages de combustible, mais il note qu'ils ne suivent pas une logique de définition cadrée.** À cet égard, EDF s'est engagé à établir une trame d'élaboration de programme de surveillance à suivre en associant à chaque constituant de l'assemblage de combustible l'ensemble des examens possibles en cas d'évolution portant sur celui-ci. **L'IRSN estime satisfaisant cet engagement qui permettra à terme de mieux maîtriser la définition du contenu des programmes de surveillance des assemblages de combustible.**

## 6. PROGRAMMES EXPÉRIMENTAUX

En amont d'une introduction généralisée d'une nouvelle conception de produit combustible, EDF procède à une phase d'irradiation expérimentale en réacteur de quelques assemblages (dits assemblages précurseurs). De manière générale, les programmes expérimentaux d'irradiation d'un nouveau produit combustible accompagnent les évolutions sensibles des assemblages de combustible ou des grappes touchant directement un aspect de la démonstration de sûreté et font l'objet d'un programme de surveillance.

Ces programmes permettent d'acquérir du REX sur le nouveau produit combustible pour confirmer son bon comportement en réacteur ainsi que les bénéfices attendus en termes de sûreté, de fiabilité et de performance. Ils permettent également de disposer du nouveau produit combustible irradié pouvant alors être utilisé pour réaliser des essais analytiques et intégraux dans le cadre d'activités de recherche. Enfin, l'acquisition de ces données sert à alimenter les dossiers en support à la démonstration de sûreté et à la validation des outils de calcul scientifique relatifs au comportement du combustible.

La période allant de 2010 à 2019 a été marquée par la finalisation des programmes expérimentaux initiés sur la période précédente et par la mise en œuvre de nouveaux programmes. Ces programmes s'inscrivent dans le cadre d'une recherche :

- d'amélioration des performances des crayons de combustible au regard du risque de rupture de gaine par interaction entre la pastille et la gaine assistée par la corrosion sous contrainte ;

- d'amélioration de la résistance de la gaine à la corrosion en fonctionnement normal ;
- d'amélioration de la fiabilité des assemblages de combustible en exploitation dans le but de limiter les pertes d'étanchéité de la première barrière et la déformation latérale des assemblages ;
- d'exploration du fonctionnement normal en étendant les taux de combustion au-delà de la valeur de 52 GWj/tU ;
- de justification de la capacité à exploiter en toute sûreté les cuves des réacteurs au-delà de la durée de vie retenue à la conception de 40 ans ;
- de résorption d'un défaut de conception des crayons de combustible MOX.

**De manière générale, l'IRSN note que les programmes expérimentaux finalisés dans la période allant de 2010 à 2019 ont répondu de manière satisfaisante aux objectifs visés et, dans certains cas, ont conduit à ne pas donner suite.** Par ailleurs, plusieurs de ces programmes sont toujours en cours de mise en œuvre comme le programme expérimental GAIA (nouvelle conception d'assemblage). À cet égard, EDF s'est engagé à mettre en œuvre dans les meilleurs délais l'étape de qualification d'assemblages GAIA de 14 pieds à structure renforcée de conception Framatome sur un réacteur du palier 1300 MWe ou du palier N4, cette nouvelle conception d'assemblage visant à limiter le risque de perte d'étanchéité de la gaine dû aux corps migrants et la déformation latérale des assemblages en réacteur. **L'IRSN estime cet engagement satisfaisant sur le principe.**

Les futurs programmes expérimentaux concerneront notamment les produits combustibles dits « *Enhanced Accident Tolerant Fuel - ATF* », conçus pour être plus performants en exploitation que les produits combustibles actuels et plus robustes lors de situations accidentelles. L'introduction en réacteur d'assemblages expérimentaux d'irradiation de conception ATF de chacun des fournisseurs est prévue entre fin 2022 et début 2023.

## 7. DÉMONSTRATION DE SÛRETÉ

La démonstration de sûreté déterministe présentée dans les rapports de sûreté (RDS) s'appuie sur les études des conditions de fonctionnement normal, incidentel et accidentel des réacteurs. Pour chaque étude, des critères de sûreté doivent être respectés, dont certains sont spécifiques au combustible. Sur la période allant de 2010 à 2019, le référentiel de sûreté a fait l'objet d'évolutions pour tenir compte de l'exploitation des réacteurs, de l'état réel du combustible, de l'état des connaissances ainsi que de nouveaux développements de méthodes d'étude ou d'outils de calcul. Ces évolutions ont fait l'objet d'expertises de la part de l'IRSN.

Concernant l'exploitation des réacteurs, les études du RDS sont réalisées en retenant une unique conception d'assemblage (appelé « assemblage de référence ») ainsi que des plans de chargement prévisionnels (nature du combustible et positionnement des assemblages dans le cœur) en nombre limité. Or, EDF est amené à recharger dans un même cœur des assemblages de fournisseurs différents ou de conceptions différentes. Ces différences de conception sont prises en compte au travers d'une démarche appelée « cœur mixte » qui a connu des évolutions sur la période allant de 2010 à 2019 à la suite de demandes formulées par l'ASN. De plus, afin d'accommoder des aléas de fabrication des assemblages de combustible et d'accroître la souplesse de la planification des arrêts des réacteurs, EDF met en œuvre une variabilité des recharges au-delà de ce qui est prévu dans le RDS. EDF a alors développé une démarche de prise en compte de cette variabilité. Ces démarches ont été expertisées par l'IRSN et jugées acceptables.

Concernant l'état réel du combustible, il doit être autant que possible pris en compte dans la démonstration de sûreté. D'une part, certains crayons de combustible peuvent perdre leur étanchéité en fonctionnement normal, ce qui peut mettre en cause les conclusions de certaines études de sûreté. D'autre part, les assemblages de combustible se déforment latéralement pendant leur irradiation dans le cœur des réacteurs, ce qui peut mettre en cause la suffisance du dimensionnement des systèmes de surveillance et de protection du cœur. EDF a donc développé des démarches d'analyse visant à prendre en compte les conséquences de la déformation latérale des assemblages sur la démonstration de sûreté. Ces démarches ont été expertisées dans le cadre de la préparation

de la réunion du Groupe permanent pour les réacteurs nucléaires (GPR) dédiée aux « Critères de tenue du combustible » et plusieurs compléments doivent encore être expertisés. Enfin, des événements anormaux en fabrication peuvent affecter la qualité du combustible. À cet égard, la prise en compte des non-conformités de fabrication des pastilles de combustible MOX a nécessité une démonstration de sûreté spécifique qui a été analysée par l'IRSN et considérée acceptable.

Concernant l'état des connaissances, EDF a valorisé le REX d'exploitation ainsi que les résultats des activités de recherche et développement acquis en France et à l'international pour réexaminer la pertinence des critères relatifs à la tenue de la première barrière compte tenu des évolutions de conception des assemblages de combustible. La révision des critères, qui a notamment concerné le comportement du combustible en situation d'accident de perte de réfrigérant primaire (APRP) et d'éjection d'une grappe de commande, a été expertisée dans le cadre de plusieurs réunions de GPR dédiées et certains compléments sont encore en cours d'expertise par l'IRSN.

Concernant les nouveaux développements de méthodes d'étude ou d'outils de calcul scientifique, l'appropriation de l'état des connaissances a conduit EDF à faire évoluer la modélisation de certains phénomènes physiques liés au comportement du combustible dans les études de sûreté. En particulier, dans le cadre de la refonte du référentiel d'étude de l'APRP, EDF a développé une nouvelle méthode complexe prenant en compte des phénomènes physiques jusque-là non ou mal modélisés. Cette nouvelle méthode n'a pas été jugée acceptable en l'état par l'IRSN et certains compléments sont en cours d'expertise. Par ailleurs, l'IRSN souligne le travail conséquent d'EDF pour faire évoluer les outils de calcul scientifique relatifs au comportement thermomécanique, thermique et mécanique du combustible. Enfin, le REX des expertises des dossiers visant à justifier l'applicabilité des corrélations de flux critique<sup>10</sup> montre l'importance de s'appuyer sur des essais de flux critique aussi représentatifs que possible de la conception des assemblages de combustible chargés dans le cœur des réacteurs et des conditions thermohydrauliques rencontrées dans les études de sûreté.

**De manière générale, si certaines évolutions font encore l'objet d'expertises, l'IRSN estime que ces évolutions constituent des avancées notables en termes de robustesse de la démonstration de sûreté des réacteurs exploités par EDF.** L'intégration de ces évolutions est réalisée préférentiellement dans le cadre des réexamens périodiques de sûreté dans la mesure où elle implique un travail conséquent de reprise d'études dans les RDS.

## 8. CONCLUSION

La prise en compte du REX, tant national qu'international, par les exploitants est un élément important du processus d'amélioration continue de la sûreté. À ce titre, EDF a dressé un bilan couvrant la période allant de 2010 à 2019 du REX d'exploitation et de fabrication des produits combustibles pour en tirer des enseignements visant à améliorer la sûreté. Sur cette période, EDF a engagé de nombreuses évolutions de la conception et de la fabrication des produits combustibles, de la composition des cœurs des réacteurs et de la chimie du circuit primaire. Ces évolutions sont notamment motivées par l'amélioration de la fiabilité et des performances en exploitation, la prise en compte des évolutions du référentiel de sûreté, la cohérence du cycle du combustible, la sécurité d'approvisionnement et l'intégration du REX.

L'IRSN estime que le REX ne révèle pas de dérive dans la maîtrise de la fabrication des produits combustibles, hormis pour les produits fabriqués à l'usine de Melox. À cet égard, l'effet des actions de remise à niveau de l'usine de Melox pour améliorer la fiabilité des produits combustibles et les capacités de production reste à confirmer. De plus, tous les incidents de fabrication font l'objet d'un traitement par les fournisseurs de produits

---

<sup>10</sup> La corrélation de flux critique permet, en fonction des conditions thermohydrauliques locales (pression, température, vitesse massique du réfrigérant) de prédire le flux critique, c'est-à-dire le niveau de flux thermique qui conduirait à l'apparition de la crise d'ébullition conduisant à une forte dégradation des conditions de refroidissement du combustible. Cette corrélation est notamment utilisée pour dimensionner les alarmes et les protections du cœur du réacteur.

combustibles. Leur surveillance par EDF est satisfaisante et EDF doit poursuivre la sensibilisation de ses fournisseurs afin de maintenir la qualité attendue des produits combustibles.

Par ailleurs, l'IRSN estime que la prise en compte du REX d'exploitation en France est satisfaisante, EDF et ses fournisseurs ayant systématiquement pris les dispositions nécessaires dans le but de remédier aux difficultés survenues. En particulier, les différentes causes de pertes d'étanchéité de la première barrière ont toutes fait l'objet d'un traitement correctif, et la situation actuelle des réacteurs du parc en exploitation vis-à-vis de la déformation latérale des assemblages s'est nettement améliorée. En outre, l'IRSN note positivement qu'EDF poursuit ses efforts pour améliorer les moyens d'identification de défaillances des produits combustibles et pour déployer des nouvelles conceptions de produits combustibles en s'appuyant notamment sur des programmes expérimentaux d'irradiation.

De plus, l'IRSN note qu'EDF continue d'enrichir les données acquises sur le comportement des produits combustibles, notamment en vue d'une meilleure compréhension des phénomènes physiques, en réalisant une surveillance qui doit être de qualité et adaptée aux produits irradiés en réacteur. À cet égard, à la lumière du REX d'évènements récents, l'IRSN souligne qu'EDF devra tenir au plus vite son engagement, pris au cours de la présente expertise, d'améliorer le suivi des examens télévisuels réalisés sur les assemblages de combustible irradiés.

Enfin, l'IRSN souligne que le référentiel de sûreté a fait l'objet d'évolutions notables en termes de robustesse, dont certaines font encore l'objet d'expertises, pour tenir compte de l'exploitation des réacteurs, de l'état réel du combustible, de l'état des connaissances ainsi que de nouveaux développements de méthodes d'étude ou d'outils de calcul.

En tout état de cause, si la prise en compte du REX sur la période allant de 2010 à 2019 est globalement satisfaisante, l'IRSN estime que les évènements récents survenus en France doivent toutefois conduire EDF à faire preuve d'une vigilance accrue sur le comportement des produits combustibles en réacteur et à s'appuyer davantage sur le REX à l'international.

**IRSN**

Le Directeur général

Par délégation

Frédérique PICHEREAU

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté