

Fontenay aux roses, le 3 août 2022

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

## AVIS IRSN N° 2022-00171

---

<b>Objet</b>	<b>EDF - REP - Centrale nucléaire de Paluel - INB 104 - Réacteur N° 2 pour le cycle 25 - Conformité du cœur à la gestion de combustible Gemmes VD3.</b>
<b>Réf.</b>	[1] Lettre ASN - CODEP-DCN-2022-033690 du 28 juillet 2022. [2] Lettre ASN - CODEP-CAE-2020-062469 du 22 décembre 2020. [3] Lettre ASN - CODEP-DCN-2014-033448 du 23 juillet 2014. [4] Avis IRSN N°2022-00096 du 5 mai 2022.

---

Conformément à la demande formulée par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) en référence [1], l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) a examiné l'acceptabilité, au plan de la sûreté, de la demande d'autorisation, déposée par EDF, relative à la modification de l'inventaire en assemblages neufs du 25<sup>e</sup> cycle d'irradiation du réacteur n° 2 du centre nucléaire de production d'électricité (CNPE) de Paluel.

### 1. CONTEXTE

Lors du déchargement du cœur du réacteur n° 2 du CNPE de Paluel intervenu fin 2019 à l'issue de son 23<sup>e</sup> cycle d'irradiation (Paluel 223<sup>1</sup>), EDF a constaté, par examens télévisuels, des dépôts de produits de corrosion de type CRUD<sup>2</sup> sur un grand nombre d'assemblages de combustible et la perte d'étanchéité de trois crayons de combustible.

Dans l'attente d'une caractérisation de l'impact éventuel de ces dépôts de CRUD sur la gaine des crayons de combustible, EDF a décidé qu'aucun assemblage irradié pendant le 23<sup>e</sup> cycle ne serait rechargé pour le cycle suivant. Ainsi, le cœur du cycle Paluel 224 a été constitué d'une recharge standard neuve<sup>3</sup>, d'assemblages neufs

---

<sup>1</sup> Paluel 223 : 23<sup>e</sup> cycle d'irradiation du réacteur n° 2 du CNPE de Paluel.

<sup>2</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>3</sup> Pour les réacteurs du palier 1300 MWe exploités en gestion de combustible GEMMES, lors de l'opération de renouvellement du combustible, une recharge standard est constituée de 64 assemblages de combustible neufs (le cœur entier est composé de 193 assemblages).

sous-enrichis et d'assemblages issus des réserves de gestion<sup>4</sup>. Plus précisément, le cœur du cycle Paluel 224 comportait 80 % d'assemblages neufs, dont plus de la moitié présentait des enrichissements réduits par rapport à l'enrichissement de référence de la gestion de combustible GEMMES. Ces assemblages faiblement enrichis ont servi à reproduire le comportement neutronique des assemblages irradiés manquants, afin de limiter les écarts par rapport au cycle de référence GEMMES. Aussi, EDF a mis en œuvre, pour ce cycle, des dispositions particulières d'exploitation avec notamment un fonctionnement à puissance abaissée, une surveillance et un contrôle de la chimie du circuit primaire, afin de s'assurer de l'absence d'occurrence d'un nouveau dépôt de CRUD. Par ailleurs, à l'issue de l'expertise menée par l'IRSN, des essais physiques supplémentaires par rapport au programme d'essais standard du chapitre X des règles générales d'exploitation (RGE) ont été mis en œuvre, pendant ce cycle, afin de vérifier que le cœur se comportait conformément à l'attendu.

Ces dispositions ont été jugées suffisantes et l'ASN a autorisé la divergence du réacteur n° 2 du CNPE de Paluel pour son 24<sup>e</sup> cycle d'irradiation [2].

À l'issue du cycle Paluel 224, les examens télévisuels réalisés sur l'ensemble du cœur ont montré qu'un nombre limité d'assemblages présente encore des dépôts de CRUD, les dépôts constatés étant en très faible quantité et localisés sur de petites surfaces en comparaison de ce qui avait été observé à l'issue du cycle Paluel 223. EDF prévoit donc de recharger en l'état certains de ces assemblages pour le cycle Paluel 225.

Le cœur du cycle Paluel 225 est constitué d'une recharge standard neuve complétée par 17 assemblages neufs sous-enrichis et d'une partie des assemblages issus du cycle précédent. EDF prévoit donc un retour progressif à un inventaire du cœur standard de la gestion de combustible GEMMES à l'état technique correspondant à la troisième visite décennale (VD3) avec l'introduction, dans une moindre proportion, d'assemblages sous-enrichis pour un premier cycle. Néanmoins, le plan de chargement prévisionnel pour le cycle Paluel 225 demeure atypique par rapport au plan de chargement du cycle à l'équilibre de la gestion de combustible GEMMES. En outre, le cycle Paluel 224 a été écourté du fait de l'atteinte d'une épaisseur de corrosion limite sur les crayons de combustible des assemblages disposant d'un gainage en Zircaloy-4. En effet, la sensibilité de ce gainage vis-à-vis de la corrosion contraint à en limiter la sollicitation dès l'atteinte d'une épaisseur de corrosion définie (voir les « *contraintes zircaloy* » prescrites par l'ASN dans la lettre en référence [3]). Cet arrêt fortement anticipé participe ainsi également au caractère atypique du plan de chargement prévisionnel pour le cycle Paluel 225 puisque que les assemblages issus du cycle précédent seront plus réactifs que prévus.

Enfin, pour ce cycle, et contrairement au précédent, EDF n'a pas prévu de réaliser des essais physiques supplémentaires par rapport au programme d'essais standard du chapitre X des RGE et prévoit un fonctionnement à pleine puissance du réacteur.

Toutefois, EDF reconduit les dispositions particulières relatives à la surveillance et au contrôle de la chimie du circuit primaire afin de s'assurer de l'absence d'occurrence d'un nouveau dépôt de CRUD.

Ainsi, par la lettre en référence [1], l'ASN souhaite recueillir l'avis de l'IRSN sur les sujets suivants :

- « *l'applicabilité du référentiel Gemmes VD3 1300 au plan de chargement de Paluel 225, incluant notamment les études d'interaction pastille gaine (IPG<sup>5</sup>) ;*
- *la suffisance du programme d'essais physiques proposé pour ce plan de chargement atypique ;*

<sup>4</sup> Des réserves de gestion sont constituées dans le bâtiment combustible afin de pouvoir utiliser des assemblages de substitution en cas d'aléa susceptible d'affecter les assemblages devant être rechargés dans le cœur (problème de fretting, assemblages endommagés au rechargement...).

<sup>5</sup> Ce risque est à considérer dès lors que le contact entre la pastille et la gaine d'un crayon de combustible est établi (jeu fermé). S'il n'y a pas de risque de rupture de gaine en régime permanent, celui-ci apparaît dès lors que le crayon de combustible subit de fortes augmentations de puissance, la gaine étant alors sollicitée en traction. L'intégrité de la première barrière (gaine des crayons de combustible) doit être démontrée pour toutes les conditions de fonctionnement de dimensionnement de catégories 1 (fonctionnement normal) et 2 (fonctionnement incidentel).

- *la position de l'exploitant sur l'absence de nécessité de mise en œuvre de dispositions particulières de surveillance du cycle 225.* »

L'avis de l'IRSN sur ces différents points est présenté ci-dessous.

## 2. APPLICABILITÉ DU RÉFÉRENTIEL GEMMES VD3 1300

### Évaluation de la sûreté de la recharge

L'évaluation de la sûreté de la recharge produite par EDF repose sur les calculs de « paramètres clés » qui permettent de s'assurer que les caractéristiques de la recharge respectent les hypothèses prises en compte dans les études d'accident génériques, ou bien que la recharge est moins pénalisante que les recharges théoriques considérées dans les études. Cette démonstration fait l'objet du dossier spécifique d'évaluation de la sûreté de la recharge (DSS) transmis par EDF. Du fait du caractère atypique du plan de chargement associé au cycle Paluel 225, le DSS est accompagné d'une justification de l'applicabilité du référentiel GEMMES à l'état VD3 à ce plan. Cette justification couvre la suffisance des paramètres clés vérifiés dans le DSS.

L'analyse d'EDF, consistant à vérifier l'applicabilité des conclusions des études d'accident du rapport de sûreté de la gestion de combustible GEMMES à l'état VD3 au plan de chargement associé au cycle Paluel 225, est basée sur l'analyse successive :

- des accidents pour lesquels une vérification des paramètres clés généraux<sup>6</sup> est effectuée en recharge : les paramètres clés qui présentent des dépassements en présentaient également pour le cycle précédent, mais ces dépassements sont d'ampleur plus limitée sur le cycle Paluel 225. Ainsi, EDF reconduit les justifications présentées pour le cycle Paluel 224 et acceptées par l'ASN dans la lettre en référence [2]. **L'IRSN estime que ces justifications restent applicables au cycle Paluel 225 ;**
- des accidents pour lesquels une vérification directe du critère de sûreté est effectuée en recharge : aucun dépassement n'est observé sur le cycle Paluel 225, contrairement au cycle précédent ;
- des accidents pour lesquels une vérification, entre autres, de paramètres clés spécifiques<sup>7</sup> est effectuée en recharge : aucun dépassement de ces paramètres n'est détecté pour l'ensemble des accidents étudiés sur le cycle Paluel 225, excepté pour l'incident de chute de grappe(s). Afin de traiter ce dépassement et d'assurer la protection du cœur contre la crise d'ébullition, EDF modifie, sur la deuxième partie du cycle, la valeur du seuil associé à la chaîne de protection afférente, cette valeur du seuil étant alors la même que celle considérée sur l'ensemble du cycle Paluel 224. **Ceci n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN.**

Enfin, contrairement au cycle Paluel 224 pour lequel le cœur était composé d'assemblages à gainage M5 et Zircaloy-4, le cœur associé au cycle Paluel 225 est composé entièrement d'assemblages à gainage M5, ce qui a conduit EDF à reprendre l'étude de l'accident d'éjection de grappe. EDF montre le respect de l'ensemble des critères de sûreté pour cet accident. **Ceci n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN.**

### Analyse du risque de rupture des crayons par interaction entre la pastille et la gaine (IPG)

Un fonctionnement à puissance intermédiaire pendant une longue durée conduit à une réduction du diamètre de la gaine des crayons de combustible. Ce mode de fonctionnement est défavorable vis-à-vis du risque de rupture de gaine des crayons de combustible par IPG, notamment en cas d'augmentation rapide de puissance

<sup>6</sup> Les paramètres clés généraux sont principalement des paramètres neutroniques macroscopiques servant d'hypothèses aux études d'accident. Pour les accidents dont la distribution de puissance varie peu, le respect des paramètres clés généraux est suffisant pour garantir l'applicabilité des études qui leur sont associées.

<sup>7</sup> Les paramètres clés spécifiques sont associés aux accidents pour lesquels la distribution de puissance évolue sensiblement. Pour ces accidents, le respect des paramètres clés généraux est nécessaire, mais il n'est pas suffisant pour assurer le caractère enveloppe de l'étude générique.

lors d'un transitoire de catégorie 2<sup>8</sup> dans la mesure où les pastilles de combustible se dilatent plus rapidement que la gaine. Ainsi, EDF doit démontrer l'intégrité des gaines (première barrière) malgré ce risque. Les résultats des études IPG se traduisent par une prescription en termes de limitation de la durée de fonctionnement prolongé à puissance intermédiaire (FPPI) figurant dans les spécifications techniques d'exploitation (STE).

Afin de démontrer l'applicabilité du référentiel de sûreté GEMMES VD3 au cycle Paluel 225, EDF met en avant, d'une part le conservatisme de la méthode utilisée pour définir les STE sur ce référentiel, plus pénalisante que la méthodologie IPG renouvelée, utilisée sur les référentiels plus récents, et d'autre part les caractéristiques de l'alliage M5. En effet, EDF valorise le fait que la totalité des crayons de combustible du cycle Paluel 225 est dotée de gaines en alliage M5, moins sensible au risque IPG que l'alliage Zircaloy-4 utilisé dans l'étude de référence. Dans son avis en référence [4], l'IRSN avait estimé que l'acceptabilité de la méthodologie utilisée pour quantifier la différence de comportement des matériaux de gainage n'est pas formellement démontrée. Toutefois, **l'IRSN a la raisonnable assurance que l'utilisation de crayons de combustible à gainage en alliage M5 permet de dégager des marges suffisantes au regard du risque IPG.**

**L'IRSN estime donc que les conclusions de la démonstration de sûreté ne devraient pas être mises en cause pour le 25<sup>e</sup> cycle du réacteur n° 2 du CNPE de Paluel.**

### 3. SUFFISANCE DU PROGRAMME D'ESSAIS PHYSIQUES

Le programme d'essais physiques au redémarrage à puissance nulle et en puissance permet, d'une part de vérifier la conformité du cœur à travers les mesures des paramètres caractéristiques du comportement neutronique, et d'autre part de calibrer l'instrumentation nucléaire utilisée pour la surveillance et la protection du cœur.

Compte tenu du caractère atypique du plan de chargement du cœur pour le cycle Paluel 224, EDF avait réalisé des essais physiques complémentaires à puissance nulle<sup>9</sup> ainsi que des cartes de flux en puissance (au palier 45-50 % Pn<sup>10</sup>) et avec des grappes insérées au voisinage de leur insertion limite en début, milieu, et fin de cycle.

Si le plan de chargement du cycle Paluel 225 est également atypique, EDF n'a toutefois pas prévu la réalisation d'essais physiques complémentaires au programme standard de la gestion GEMMES VD3. EDF justifie cette décision en s'appuyant, d'une part sur le fait que la réalisation des essais complémentaires lors du cycle précédent n'a pas conduit à des dépassements de critère, et d'autre part sur une analyse de similitude du comportement physique du cœur entre le cycle Paluel 225 et un grand nombre de cycles en gestion GEMMES VD3, dont le cycle Paluel 224.

**L'IRSN considère cette analyse satisfaisante et estime que le programme standard d'essais physiques de la gestion de combustible GEMMES à l'état VD3 est suffisant pour le cycle Paluel 225.**

### 4. DISPOSITIONS PARTICULIÈRES POUR LE CYCLE À VENIR

Afin de garantir la sûreté lors du cycle Paluel 224, et en particulier limiter les dépôts de CRUD et le risque de perte d'étanchéité des gaines de combustible, EDF avait appliqué les dispositions d'exploitation particulières suivantes :

- des dispositions relatives à la chimie du fluide primaire, à savoir la sécurisation et la remise en œuvre de l'injection de zinc ainsi que la réalisation d'un suivi renforcé des caractéristiques physiques et chimiques du

<sup>8</sup> Les transitoires de catégorie 2 correspondent à des situations incidentelles de fréquence modérée (fréquence d'apparition annuelle par réacteur supérieure à 10<sup>-2</sup>).

<sup>9</sup> Ces essais comprennent des mesures de la concentration en bore du circuit primaire et du coefficient isotherme de température lorsque le groupe de régulation de la température moyenne du circuit primaire (groupe R) est inséré, ainsi que des mesures de l'efficacité neutronique du groupe R par dilution.

<sup>10</sup> Puissance nominale.

circuit primaire (pH, teneur en polluants et métaux, teneur en hydrogène, débit ...), notamment pendant la phase de démarrage du réacteur jusqu'à l'atteinte du palier nominal afin de limiter la formation, le transport et le dépôt de CRUD ;

- une limitation de la puissance maximale du réacteur à 93 % Pn afin de limiter l'occurrence d'un régime d'ébullition nucléée, identifiée comme favorisant le dépôt du CRUD.

Les faibles dépôts de CRUD observés par EDF à l'issue du cycle Paluel 224, sur un nombre d'assemblages plus limité qu'au cycle précédent, confirment l'efficacité des dispositions relatives à la chimie du fluide primaire et à la limitation de la puissance du réacteur.

Pour le cycle Paluel 225, EDF prévoit de reconduire les dispositions relatives à la chimie du fluide primaire qui vont permettre de réduire encore le terme source corrosion<sup>11</sup> dans ce fluide.

*A contrario*, EDF ne reconduit pas la limitation de la puissance maximale du réacteur dans la mesure où la quantité maximale de vapeur produite par les assemblages à la suite de l'ébullition nucléée est similaire entre le cycle Paluel 225 et le cycle Paluel 223 pour le même niveau de puissance (100 % Pn) et que le terme source corrosion est significativement moindre pour le cycle Paluel 225.

**Compte tenu de ces éléments, l'IRSN considère acceptable le fonctionnement à puissance nominale pour le cycle Paluel 225 et suffisantes les dispositions retenues relatives à la chimie du fluide primaire.**

## 5. CONCLUSION

À l'issue de l'expertise des éléments apportés par EDF, l'IRSN n'a pas d'objection à la mise en œuvre du plan de rechargement retenu pour le 25<sup>e</sup> cycle du réacteur n° 2 du CNPE de Paluel et il considère suffisantes les dispositions prévues par EDF concernant la chimie du fluide primaire en vue de limiter la formation, le transport et le dépôt de CRUD.

**IRSN**

Le Directeur général

Par délégation

Frédérique PICHEREAU

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté

---

<sup>11</sup> Le terme source corrosion désigne les produits d'activation qui sont issus de la corrosion des matériaux présents dans le fluide primaire. La présence de ce terme source dans le réacteur n° 2 du CNPE de Paluel est liée, en premier lieu, au remplacement des générateurs de vapeur lors de la VD3 du réacteur. Par ailleurs, l'exploitation de ce réacteur lors du cycle 23 avec un pH faible et l'absence de conditionnement en Zinc avait favorisé la formation de produits de corrosion, et donc l'apparition de CRUD, dans les zones chaudes du cœur concernées par l'ébullition nucléée.