

Fontenay aux roses, le 18 décembre 2020

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

## AVIS IRSN N° 2020-00208

---

**Objet :** EDF - REP - Centrale nucléaire de Paluel - INB 104 - Redémarrage du réacteur N° 2 pour la campagne 24 - Conformité du cœur à la gestion de combustible Gemmes VD3 et chimie primaire mise en œuvre.

---

**Réf. :** [1] Lettre ASN - CODEP-CAE-2020-055022 du 14 décembre 2020.  
[2] Lettre ASN - CODEP-DCN-2014-033448 du 23 juillet 2014.  
[3] Avis IRSN - 2020-00167 du 28 octobre 2020.  
[4] Lettre ASN - CODEP-DCN-2020-011105 du 12 février 2020.

---

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, des éléments apportés par EDF portant sur les spécificités de la campagne 24 du réacteur N° 2 du centre nucléaire de production d'électricité (CNPE) de Paluel.

### 1. CONTEXTE

Le réacteur N° 2 de Paluel a été arrêté le 16 mai 2015 à l'occasion de sa troisième visite décennale au cours de laquelle le premier remplacement des générateurs de vapeurs (RGV) du palier de 1300 MWe a été réalisé. Lors de ce remplacement, la chute d'un générateur de vapeur (GV) lors de sa manutention a conduit à la prolongation significative de cet arrêt de près de trois années.

Le réacteur a pu être rechargé en combustible en mai 2018 pour sa 23<sup>ème</sup> campagne de production (Paluel 223<sup>1</sup>). Celle-ci a été marquée par l'atteinte tardive du palier nominal compte tenu d'évènements fortuits sur le circuit secondaire<sup>2</sup>. De plus, le réacteur a été déclaré le 10 août 2019 en présomption de défaut de gainage de crayons de combustible<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> Paluel 223 : Paluel = site, 2 = numéro du réacteur, 23 = numéro de la campagne (cycle de production).

<sup>2</sup> Le 30 juillet 2018, lors de la première montée en puissance, des capteurs de pression de la première roue de la turbine sont déclarés non fonctionnels. Puis, début août 2018, après réparation, un nouveau fortuit survient, cette fois-ci sur une turbopompe alimentaire.

<sup>3</sup> La perte d'étanchéité de crayons de combustible peut être détectée en exploitation par le suivi de l'activité radioactive du circuit primaire prescrit par les spécifications radiochimiques des règles générales d'exploitation (RGE). À l'atteinte d'un certain seuil, le réacteur est déclaré en présomption de défauts de gainage et fait l'objet d'un suivi renforcé par EDF.

Lors du déchargement du cœur intervenu fin novembre 2019, EDF a constaté, par examens télévisuels, des dépôts de corrosion de type CRUD<sup>4</sup> sur un grand nombre d'assemblages de combustible et la perte d'étanchéité de trois crayons de combustible.

EDF n'a pas prévu de recharger les assemblages irradiés pendant la campagne 23 pour celle à venir<sup>5</sup>. Faute de pouvoir constituer un nouveau cœur avec ses seules réserves de gestion, EDF a commandé à Framatome des assemblages neufs enrichis à des taux inférieurs à ceux de la gestion de combustible GEMMES. Ainsi, le cœur de la campagne Paluel 224 est constitué d'une recharge standard neuve, d'assemblages neufs sous enrichis et d'assemblages issus des réserves de gestion<sup>6</sup>.

Pour cette campagne, EDF a prévu des dispositions particulières d'exploitation du réacteur, de surveillance et de contrôle de la chimie du circuit primaire afin de s'assurer de l'absence d'occurrence d'un nouveau dépôt de CRUD. Par ailleurs, EDF a déposé une demande de modification temporaire du chapitre X des règles générales d'exploitation (RGE) visant à compléter le programme des essais physiques, afin de vérifier que le cœur de se comporte conformément à l'attendu.

Ainsi, par la lettre en référence [1], l'ASN souhaite recueillir l'avis de l'IRSN sur l'acceptabilité, au plan de la sûreté « *du cœur et de la chimie du cycle 24 du réacteur N° 2 de Paluel* ».

En particulier, l'ASN souhaite connaître l'avis de l'IRSN aux questions suivantes :

- *« la chimie mise en œuvre par l'exploitant est-elle suffisante pour prévenir la formation, le transport et le dépôt de CRUD sur les éléments combustible tout au long du cycle 24 ?*
- *l'exploitant doit-il mettre en œuvre des dispositions particulières de surveillance pour le cycle à venir sur le cœur, sur la chaudière et sur la chimie du circuit primaire ?*
- *la vérification des paramètres clés est-elle suffisante pour garantir la sûreté du cœur de Paluel 224 ?*
- *les essais physiques du cœur (au démarrage et en cours de cycle) prévus pour la campagne 24 sont-ils suffisants ?*
- *les dispositions de conduite particulières prévues dans les spécifications techniques d'exploitation ou hors des spécifications techniques d'exploitation, ou des dispositions compensatoires (notamment lors du démarrage avant l'atteinte de la criticité et après la divergence) pour limiter le risque de dépôt de nouveau CRUD sur le combustible sont-elles suffisantes ?*
- *les opérations de contrôle prévues sur les assemblages lors du déchargement à l'issue de la campagne 224 sont-elles suffisantes ? ».*

## 2. CHIMIE DU CIRCUIT PRIMAIRE

La campagne Paluel 223 a été marquée par des circonstances et des événements particuliers favorisant la formation et le dépôt de CRUD sur les crayons de combustible :

<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> EDF mène actuellement une campagne d'examen et de nettoyage des assemblages de combustible irradiés pendant la campagne 23.

<sup>6</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 habituellement constituée de 64 assemblages de combustible neufs (le cœur entier est composé de 193 assemblages).

- un terme source corrosion<sup>7</sup> important résultant du RGV. Les générateurs de vapeur installés sont issus de gammes de fabrication anciennes<sup>8</sup> et devraient conduire à un relâchement de produits de corrosion pendant plusieurs cycles ;
- de nombreux aléas responsables d'une atteinte tardive du palier nominal<sup>9</sup>. Ce fonctionnement à puissance réduite a conduit à une chimie du circuit primaire défavorable, en particulier un pH faible pendant les 60 premiers jours de fonctionnement. En effet, un pH acide favorise la mise en solution des produits de corrosion des surfaces métalliques en contact avec le fluide du circuit primaire<sup>10</sup> et leur dépôt sur les crayons de combustible (qui constituent le point chaud du circuit primaire<sup>11</sup>) ;
- l'absence inhabituelle d'injection de zinc dans le circuit primaire pour cause d'avarie de la pompe d'injection<sup>12</sup>. La présence de zinc permet de fixer les produits de corrosion des surfaces métalliques ce qui limite leur transport dans le circuit primaire et leur dépôt sur les crayons de combustible.

EDF considère que la présence de CRUD sur un nombre conséquent d'assemblages est responsable des trois pertes d'étanchéités de crayons de combustible constatées lors du déchargement de Paluel 223. En effet, le CRUD dégrade les échanges thermiques entre la gaine et le fluide primaire, conduisant à un échauffement local de la gaine et à l'accélération de sa corrosion jusqu'à son percement. Cette conclusion est confirmée par le retour d'expérience (REX) international, principalement américain.

**L'IRSN estime satisfaisante l'analyse menée par EDF des évènements survenus lors de la campagne Paluel 223 conduisant à la formation et au dépôt de CRUD, responsable de la perte d'étanchéité de trois crayons de combustible.**

S'appuyant notamment sur les dispositions prises par les exploitants américains<sup>13</sup>, EDF a prévu des dispositions complémentaires aux spécifications chimiques afin de limiter la formation, le transport et le dépôt de CRUD pour la campagne Paluel 224. Elles reposent notamment sur l'injection de zinc<sup>14</sup> et sur la mise en œuvre d'un suivi renforcé des caractéristiques physiques et chimiques du circuit primaire (pH, teneur en polluants et métaux, teneur en hydrogène, débit, etc.). Des points d'arrêts sont également prévus tout au long de la phase de démarrage du réacteur jusqu'à l'atteinte du palier nominal. Si la chimie du fluide primaire n'est pas conforme à l'attendu, des actions correctives seront alors mises en œuvre (ajustement du pH, palier stabilisé d'épuration via le système de contrôle chimie et volumique (RCV)<sup>15</sup>, etc.) avant de poursuivre la phase de démarrage du réacteur.

---

<sup>7</sup> Désigne les produits d'activation qui sont issus de la corrosion des matériaux présents dans le fluide primaire.

<sup>8</sup> La fabrication des tubes de générateurs de vapeur a évolué depuis les années 1990 dont les générateurs de vapeur du réacteur N° 2 de Paluel font partie.

<sup>9</sup> Habituellement, une montée en puissance après rechargement des assemblages de combustible est réalisée en quelques jours. Dans le cas du réacteur N° 2 de Paluel, l'atteinte du palier nominal a nécessité plus d'un mois et demi (de fin juillet à mi-septembre 2018).

<sup>10</sup> Les tubes des générateurs de vapeurs représentent près de 70 % de la surface métalliques en contact avec le fluide du circuit primaire.

<sup>11</sup> Dans les conditions chimiques de pureté du fluide primaire, la solubilité des produits de corrosion décroît à mesure que la température augmente.

<sup>12</sup> En effet, la disponibilité de la pompe permettant l'injection de zinc dans le circuit primaire n'est pas requise par les règles générales d'exploitation.

<sup>13</sup> Ces dispositions sont notamment conformes aux recommandations formulées par l'EPRI (Electric Power Research Institute) aux États-Unis.

<sup>14</sup> EDF a réalisé les travaux de remise en état de la pompe d'injection de zinc et s'assurera de sa pleine disponibilité tout au long de la campagne Paluel 224.

<sup>15</sup> Habituellement, il n'est pas nécessaire que le système RCV fonctionne à sa capacité maximale d'épuration du circuit primaire pour garantir une qualité satisfaisante. Ce système sera utilisé à sa capacité maximale tout au long de la campagne Paluel 224.

Par ailleurs, à l'issue de l'expertise, EDF s'est engagé à réviser la teneur en hydrogène dans le circuit primaire prescrite lorsque le réacteur est en état d'arrêt sur les générateurs de vapeur. **L'IRSN estime cet engagement satisfaisant. Ceci fait l'objet de l'engagement N° 1 rappelé en annexe 3.**

**Sous réserve du respect de cet engagement, l'IRSN estime satisfaisantes et suffisantes les dispositions prises par EDF concernant la chimie du circuit primaire. En particulier, les nombreux points d'arrêts prévus et la réalisation conditionnelle de paliers stabilisés constituent une démarche prudente.**

Enfin, débutant la phase de remplacement de générateurs de vapeur sur les réacteurs du palier 1300 MWe<sup>16</sup>, EDF s'est engagé à examiner, pour la fin de l'année 2021, les dispositions supplémentaires relatives à la chimie du circuit primaire à pérenniser pour les futurs RGV, afin de limiter le terme source corrosion. **L'IRSN estime cet engagement satisfaisant. Ceci fait l'objet de l'engagement N° 2 rappelé en annexe 3.**

### 3. CŒUR DE PALUEL 224

Le cœur de Paluel 224 est composé de 80 % d'assemblages neufs, dont plus de la moitié présente des enrichissements réduits par rapport à l'enrichissement de référence de la gestion de combustible GEMMES<sup>17</sup>. Tous les assemblages neufs utilisés présentent une conception identique aux assemblages de référence de la gestion de combustible GEMMES.

Par ailleurs, pour compléter le plan de chargement, EDF utilise les assemblages disponibles des réserves de gestion. Les crayons de combustible de ces assemblages, dont la conception est plus ancienne, disposent d'un gainage en Zircaloy-4. Ainsi, les contraintes d'exploitation, dites « *contraintes zircaloy*<sup>18</sup> » et prescrites par l'ASN en référence [2], s'appliquent pour la campagne Paluel 224. En particulier, la longueur totale de la campagne, le fonctionnement prolongé à puissance réduite et le suivi de charge<sup>19</sup> seront limités.

**Ces éléments n'appellent pas de remarque de la part de l'IRSN.**

### 4. APPLICABILITÉ DU RÉFÉRENTIEL GEMMES VD3 1300

EDF a transmis le dossier spécifique d'évaluation de la sûreté de la recharge (DSS<sup>20</sup>) de la campagne Paluel 224 accompagné d'une justification de l'applicabilité du référentiel GEMMES à l'état VD3 à celle-ci, en particulier la suffisance des paramètres clés vérifiés dans le DSS.

L'analyse présentée par EDF est exhaustive dans sa couverture du domaine de dimensionnement. Toutefois, l'IRSN note que les marges aux critères des études d'accidents ne sont pas quantifiées en cas de dépassement de paramètres clés, ce qui n'est pas satisfaisant dans le principe.

Toutefois, compte tenu des éléments apportés par EDF au cours de l'expertise pour justifier ces dépassements et de la prise en compte de pénalités associées à des modes de pilotage pourtant fortement restreints

<sup>16</sup> À ce jour, les RGV des réacteurs du palier 900 MWe ont tous été réalisés. Le RGV de Paluel 2 est le premier réalisé sur le palier 1300 MWe.

<sup>17</sup> Le cœur d'un réacteur est habituellement composé d'assemblages neufs et d'assemblages irradiés issus de plusieurs campagnes. Puisqu'aucun assemblage irradié lors de la campagne Paluel 223 n'est utilisé, les assemblages faiblement enrichis servent à reproduire le comportement neutronique des assemblages irradiés manquants pour la campagne Paluel 224.

<sup>18</sup> La sensibilité du gainage Zircaloy-4 vis-à-vis de la corrosion contraint à en limiter la sollicitation dès l'atteinte d'une épaisseur de corrosion définie.

<sup>19</sup> Mode de fonctionnement d'un réacteur nucléaire, qui permet de réguler son niveau de puissance en fonction des variations de la demande du réseau en énergie électrique.

<sup>20</sup> La démonstration de sûreté en recharge repose sur la vérification du respect, pour certains paramètres neutroniques dits paramètres clés, de valeurs limites issues des études génériques. Cette vérification permet de s'assurer que les conclusions des études génériques sont bien applicables à la recharge concernée.

(notamment par les « *contraintes zircaloy* »), l'IRSN estime que les conclusions de la démonstration de sûreté ne devraient pas être mises en cause pour la campagne 24 du réacteur N° 2 de Paluel.

**Nonobstant cette conclusion, l'IRSN souligne qu'EDF n'a transmis aucun élément démontrant l'applicabilité du dossier de validation de sa chaîne de calcul neutronique sur laquelle repose la démonstration de sûreté de la campagne 224 de Paluel.** L'IRSN estime que la capacité de cette chaîne à correctement modéliser le comportement du cœur de Paluel 224 n'est pas acquise dans la mesure où le plan de chargement :

- s'écarte de ceux considérés dans les études de la démonstration de sûreté de la gestion de combustible GEMMES et de ceux des réacteurs exploités selon ce référentiel ;
- présente des caractéristiques similaires à celui du premier EPR mis en service (répartition inhomogène des assemblages les plus enrichis et puissance importante en périphérie du cœur) pour lequel des écarts calcul/mesure notables ont été constatés lors des essais physiques de premier démarrage, en particulier avec la chaîne de calculs neutronique d'EDF. L'IRSN a récemment émis l'avis en référence [3] sur ce sujet.

**Ainsi, l'IRSN souligne l'importance de la réalisation du programme des essais physiques du cœur, présenté ci-dessous, qui permettra notamment de valider les calculs effectués dans le DSS de la campagne Paluel 224.**

## 5. VÉRIFICATION DE LA CONFORMITÉ DU CŒUR LORS ESSAIS PHYSIQUES

Le programme d'essais physiques au redémarrage d'un réacteur est défini de façon à :

- vérifier que le cœur se comporte conformément à l'attendu au travers des mesures de paramètres représentatifs du comportement neutronique<sup>21</sup>;
- calibrer les instrumentations de surveillance du cœur.

Du fait du caractère atypique du cœur de Paluel 224, EDF a transmis une demande de modification temporaire au chapitre X des RGE afin de compléter le programme d'essais physique du cœur, ainsi que des études permettant d'illustrer l'effet des spécificités du plan de chargement sur les paramètres du cœur et des éléments justifiant la représentativité du matériel de surveillance du cœur<sup>22</sup>.

### 5.1. IMPACT DES SPÉCIFICITÉS DU PLAN DE CHARGEMENT SUR LES PARAMÈTRES PHYSIQUES DU CŒUR

Les calculs prévisionnels de la distribution de puissance du cœur de Paluel 224 menés par EDF ont permis de mettre en évidence le caractère très atypique de ce plan de chargement par rapport au REX de la gestion de combustible GEMMES. Dans ce contexte, des dépassements conséquents ou généralisés des critères d'essais physiques ne peuvent, à ce jour, être complètement exclus lors la campagne Paluel 224. **Pour le cas où une telle situation serait rencontrée, l'IRSN considère qu'EDF devra interrompre la première montée en puissance après rechargement du combustible et évaluer les conséquences sur la démonstration de sûreté et les programmes d'essais physiques. Ce point fait l'objet de la recommandation N° 1 en annexe 1.**

Aussi, l'IRSN estime qu'EDF devra transmettre à l'ASN et l'IRSN un bilan des essais physiques réalisés à l'issue des cartes de flux au palier 6-8 % PN et à puissance nominale prescrites par le programme d'essais physiques de

<sup>21</sup> Efficacités des groupes de grappes de contrôle, distributions de puissance, etc.

<sup>22</sup> L'instrumentation du cœur permet de suivre, tout au long du cycle, l'état de celui-ci. Parmi cette instrumentation, les chaînes neutroniques de niveau de puissance ou les chambres à fission sont particulièrement importantes.

redémarrage, ainsi qu'en fin de campagne<sup>23</sup>. **Il conviendra également qu'EDF alimente, à terme, la base de validation de sa chaîne de calcul neutronique avec le REX des essais physiques de cette campagne atypique.**

Il convient de noter que certaines configurations du cœur modélisées par la chaîne de calcul neutronique d'EDF ne sont pas rencontrées lors des essais physiques. À cet égard, EDF s'est engagé à transmettre des éléments de validation cette chaîne de calcul en s'appuyant sur des calculs de référence avec un logiciel de calculs Monte-Carlo (Engagement N° 3 en annexe 3). **Sur ce point, l'IRSN considère qu'EDF devra évaluer les conséquences des résultats de ces analyses sur la démonstration de sûreté et les programmes d'essais physiques, en cas d'écart notable entre les résultats de calculs de référence Monte-Carlo et ceux obtenus avec la chaîne de calcul neutronique.**

Les assemblages issus des réserves de gestion composant le cœur de Paluel 224 sont caractérisés par une durée importante de refroidissement en piscine, comprise entre 6 et 10 ans. Une modélisation inappropriée du refroidissement de ces assemblages peut avoir un effet sur l'évaluation théorique de leur réactivité et *in fine* sur le calcul de la distribution de puissance en cœur. Au cours de l'expertise, EDF a indiqué avoir procédé à des ajustements des bibliothèques de données neutroniques considérées pour calculer la puissance dans ces assemblages et a précisé que ces ajustements ne sont pas couverts par le dossier de validation de la chaîne de calcul neutronique d'EDF. **L'IRSN estime qu'EDF devrait transmettre les éléments de validation de ces bibliothèques de données neutroniques. Ce point fait l'objet de l'observation N° 1 en annexe 2.**

Lors d'un redémarrage, l'évolution de la concentration en samarium (absorbant neutronique) dans les assemblages neufs diffère de celle dans les assemblages irradiés. Selon EDF, ce comportement différencié, qui dépend notamment du profil de la montée en puissance, influe sur la répartition de puissance entre les assemblages neufs et irradiés. La stratégie de première montée en puissance après rechargement du combustible de Paluel 224 intègre une phase de repli prolongé en arrêt à chaud afin de résorber un aléa matériel<sup>24</sup>. Ces conditions de redémarrage sont susceptibles de générer des distributions de concentration en samarium atypiques dans le cœur pouvant mettre en cause la pertinence des vérifications de la conformité de la distribution de puissance lors des essais physiques. **Ce point fait l'objet de la recommandation N° 2 en annexe 1.**

## 5.2. JUSTIFICATION DE L'EXHAUSTIVITÉ DU PROGRAMME D'ESSAIS PHYSIQUES

Lors de la phase de redémarrage, EDF prévoit de réaliser des essais physiques complémentaires à puissance nulle<sup>25</sup> et en puissance (carte de flux au palier 45-50 % PN).

Compte tenu du caractère atypique du plan de chargement de Paluel 224, l'IRSN identifie d'autres essais et analyses devant être menés par EDF afin de justifier l'aptitude de la chaîne de calcul neutronique à évaluer les paramètres physiques du cœur avec une précision satisfaisante. **Ceci fait l'objet des recommandations N° 3, N° 5 et N° 6 en annexe 1.**

Le chapitre X des RGE prescrit de vérifier le conservatisme de l'incertitude de calcul des efficacités neutroniques des groupes de régulation et d'arrêt prise en compte dans la démonstration de sûreté. La vérification de cette

<sup>23</sup> Habituellement, EDF formalise le bilan des essais physiques de la première montée en puissance de chaque campagne quelques semaines après leur réalisation.

<sup>24</sup> Compte-tenu d'un aléa sur un autre système du réacteur N° 2 de Paluel, et dans l'attente de la réparation requise, EDF prévoit de réaliser les essais physiques à puissance nulle, puis d'arrêter le réacteur.

<sup>25</sup> Ces essais comprennent les mesures de la concentration en bore (CB) du circuit primaire, du coefficient isotherme de température lorsque le groupe de régulation de la température moyenne du circuit primaire (groupe R) est inséré et de l'efficacité neutronique du groupe R par dilution.

incertitude s'appuie sur des mesures des efficacités neutroniques des groupes via la méthode dite « PDG »<sup>26</sup>. Ses résultats de mesures dépendent de données théoriques calculées au préalable, donc de l'aptitude de la chaîne de calcul neutronique à modéliser le comportement physique du cœur. EDF prévoit de démontrer l'applicabilité de cette méthode lors des essais physiques à puissance nulle de la campagne Paluel 224 en vérifiant la cohérence de la mesure PDG de l'efficacité neutronique du groupe R avec celle obtenue à partir de la méthode de mesure par dilution. Or le REX montre que la mesure PDG de l'efficacité neutronique du groupe R ne présente pas une sensibilité notable aux données théoriques susmentionnées et, *a fortiori*, à d'éventuelles difficultés de modélisation de la distribution de puissance. De ce point de vue, le plan de chargement de Paluel 224 apparaît comme étant plus sensible à de telles difficultés du fait d'une puissance relative importante en périphérie du cœur. **Dans ces conditions, l'IRSN estime que la mesure de l'efficacité neutronique du groupe R par dilution est insuffisante en regard de l'objectif visé. Ce point fait l'objet de la recommandation N° 4 en annexe 1.**

La démonstration de sûreté en cas de chute simultanée de deux grappes appartenant au sous-groupe N1<sub>1</sub> consiste à vérifier l'aptitude du système de protection du cœur à détecter une telle situation et à déclencher l'arrêt automatique du réacteur. Cette vérification prend en compte une incertitude de 10 % sur le calcul de l'efficacité neutronique de ces grappes. Le programme d'essais physiques de redémarrage à puissance nulle prescrit de vérifier cette incertitude uniquement pour des groupes complets de grappes, dont le groupe SD pour lequel l'implantation des grappes est similaire à celle des grappes du sous-groupe N1<sub>1</sub>. Par sa lettre en référence [4], l'ASN a demandé à EDF de mesurer l'efficacité neutronique du sous-groupe N1<sub>1</sub> pour le cas où l'incertitude de 10 % susmentionnée ne serait pas vérifiée pour le groupe SD, ce qui n'est pas prévu par EDF pour la campagne Paluel 224. **L'IRSN considère que cette conduite à tenir doit être appliquée pour la campagne Paluel 224, conformément à la demande de l'ASN applicable à tous les réacteurs du palier 1300 MWe<sup>27</sup>.**

Les cartes de flux prescrites par le chapitre X des RGE permettent de calibrer l'instrumentation nucléaire utilisée par les chaînes de surveillance et de protection du réacteur. Ce calibrage doit être réalisé périodiquement afin de tenir compte de la redistribution axiale et radiale de puissance dans le cœur au fur et à mesure de l'avancement dans le cycle. Le chapitre X autorise de ne pas respecter la périodicité de ces essais sous réserve de mettre en œuvre certaines mesures palliatives ayant pour objectif d'anticiper l'intervention du système de protection du cœur en cas de transitoire accidentel. Ces mesures ont été définies à partir d'un REX GEMMES conséquent de plusieurs dizaines de campagnes. Dès lors, une évolution atypique de la distribution de puissance en fonction de l'épuisement du cœur au cours de la campagne Paluel 224 pourrait mettre en cause la suffisance de ces mesures. **Ce point fait l'objet de la recommandation N° 7 en annexe 1.**

Le système de protection intégré numérique (SPIN) des réacteurs du palier 1300 MWe s'appuie sur certaines hypothèses génériques, afin de reconstruire la distribution de puissance dans le cœur. Ces hypothèses doivent permettre de garantir une évaluation suffisamment précise des marges vis-à-vis des situations de surpuissance linéique locale et de crise d'ébullition pour toutes les conditions de fonctionnement (niveau de puissance, insertion de groupe(s), etc.). L'IRSN considère que les spécificités du plan de chargement de Paluel 224 sont susceptibles de mettre en cause le caractère générique de ces hypothèses. **Ce point fait l'objet de la recommandation N° 8 en annexe 1.**

L'analyse du REX des essais de cartes de flux indique que l'apparition d'anomalies de la distribution de flux neutronique serait liée à la formation lente de dépôts de produits de corrosion préférentiellement aux points

<sup>26</sup> La méthode dite PDG (Pesée dynamique des grappes) est une technique de mesure de l'efficacité des groupes de grappe qui consiste à insérer puis extraire successivement chaque groupe à la vitesse maximale sans modification de la concentration en bore dans le fluide primaire. C'est une méthode qui permet de remplacer les essais par dilution et donc d'optimiser la durée des essais et de réduire les quantités d'effluents produits.

<sup>27</sup> À noter qu'EDF a répondu à l'ASN en septembre 2020 sur cette demande, en apportant des éléments techniques visant à justifier l'absence de nécessité de réaliser cet essai conditionnel complémentaire. À date, l'IRSN n'a pas été en mesure d'échanger avec EDF sur ce sujet.

chauds des assemblages ou à la rétention de composés borés neutrophages (adsorption à la surface de la gaine de combustible ou rétention par les dépôts)<sup>28</sup>. Or ces phénomènes physiques ne sont pas modélisés et leurs conséquences sur la distribution de puissance ne sont pas prises en compte dans la démonstration de sûreté. L'IRSN estime qu'EDF devrait transmettre les éléments techniques permettant d'évaluer le risque d'apparition d'une anomalie de la distribution de puissance pour la campagne Paluel 224 et préciser la conduite à tenir pour le cas où une telle anomalie serait constatée lors des essais physiques<sup>29</sup>. **Ce point fait l'objet de l'observation N° 2 en annexe 2.**

### 5.3. JUSTIFICATIONS DE LA REPRÉSENTATIVITÉ DU MATÉRIEL DE SURVEILLANCE DU CŒUR

Les mesures de flux neutronique par les chambres à fission mobiles (CFM) du système d'instrumentation du cœur (RIC) permettent de reconstruire la distribution de puissance lors des essais physiques de carte de flux prescrits par le chapitre X des RGE.

EDF a remplacé deux CFM lors du dernier arrêt pour renouvellement du combustible du réacteur N° 2 de Paluel.

Le REX du parc en exploitation montre que la réponse expérimentale de ces détecteurs neutroniques neufs peut être affectée d'une dérive pouvant mettre en cause la pertinence des analyses menées lors des essais de carte de flux. De ce fait, l'IRSN estime qu'EDF devrait transmettre les résultats des analyses qu'il aura menées afin de vérifier le bon comportement des CFM neuves lors des essais physiques effectués lors de la campagne de Paluel 224. **Ce point fait l'objet de l'observation N° 3 en annexe 2.**

## 6. DISPOSITIONS D'EXPLOITATION PARTICULIÈRES

En complément des dispositions d'exploitation particulières liées à l'utilisation d'assemblages à gainage en Zircaloy-4 (« *contraintes zircaloy* »), EDF prévoit de limiter la puissance maximale du réacteur à 93 % PN. La diminution de la puissance locale dans les crayons de combustible entraîne une baisse de la production de vapeur dans les zones les plus chaudes du cœur, ce qui limite le risque de dépôt de CRUD sur les crayons.

**En conséquence, l'IRSN estime pertinente la limitation de la puissance maximale du réacteur pour la campagne de Paluel 224.**

## 7. OPÉRATIONS DE CONTRÔLE AU DÉCHARGEMENT

Au-delà des dispositions prises pour limiter la formation et le dépôt de CRUD, EDF prévoit à l'issue de la campagne 24 un programme d'examen des assemblages lors de leur déchargement qui repose sur des inspections télévisuelles des crayons périphériques<sup>30</sup>, afin de s'assurer de l'absence de dépôt de CRUD. Le cas échéant, EDF prévoit la mise à disposition de moyens de nettoyage et d'extraction de crayons<sup>31</sup>. Par ailleurs, EDF a indiqué que les conclusions des examens des assemblages de la campagne Paluel 223, menées actuellement, seront prises en compte pour consolider ce programme de travail. **À ce stade, la stratégie d'EDF n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN. Il conviendra qu'EDF informe l'ASN et l'IRSN de l'avancement de ces travaux.**

<sup>28</sup> L'anomalie d'axial offset a été documentée par EDF dans le cadre de la campagne 17 du réacteur n°2 de Nogent.

<sup>29</sup> EDF a indiqué qu'une telle anomalie n'avait pas été détectée lors de la campagne Paluel 223.

<sup>30</sup> EDF a indiqué que les crayons périphériques des assemblages sont les plus touchés par le dépôt de CRUD.

<sup>31</sup> Un dispositif de nettoyage par ultrasons américain a pu être utilisé sur le réacteur N° 2 de Paluel à l'été 2020 pour éliminer le CRUD des assemblages de la campagne Paluel 223. Ainsi, EDF a réalisé des extractions de crayons avant et après nettoyage pour caractériser le dépôt et l'efficacité du nettoyage.

## 8. CONCLUSION

À l'issue de l'expertise des éléments apportés par EDF, compte tenu des conditions particulières d'exploitation retenues par EDF et sous réserve du respect des engagements et de la prise en compte des recommandations formulées en annexe 1, l'IRSN n'a pas d'objection à la mise en œuvre de la 24<sup>ème</sup> recharge du réacteur N° 2 de Paluel et considère suffisantes les dispositions relatives à la chimie du circuit primaire en vue de limiter la formation, le transport et le dépôt de CRUD.

Néanmoins, EDF devra compléter la demande de modification temporaire du chapitre X des règles générales d'exploitation en préalable à la divergence du réacteur N° 2 de Paluel, conformément aux recommandations de l'IRSN formulées en annexe 1.

**IRSN**

Le Directeur général

Par délégation

Hervé BODINEAU

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté

# ANNEXE 1 À L'AVIS IRSN N° 2020-00208 DU 18 DÉCEMBRE 2020

## Recommandations de l'IRSN

### Recommandation n° 1

En cas de dépassement conséquent ou généralisé des critères d'essais physiques de redémarrage de la campagne 24 du réacteur N° 2 de Paluel, l'IRSN recommande qu'EDF transmette une analyse détaillée des écarts, des causes et des conséquences sur la démonstration de sûreté, afin de statuer sur l'acceptabilité de poursuivre la montée en puissance.

### Recommandation n° 2

L'IRSN recommande qu'EDF interprète les essais physiques de la campagne 24 du réacteur N° 2 de Paluel en tenant compte du profil réel de la première montée en puissance après rechargement de ce réacteur.

### Recommandation n° 3

L'IRSN recommande qu'EDF vérifie, lors des essais physiques à puissance nulle de la campagne 24 du réacteur N° 2 de Paluel, le conservatisme de l'incertitude de calcul de l'efficacité différentielle du bore considérée dans la démonstration de sûreté, en tenant compte de la valeur de la concentration en bore du circuit primaire mesurée lorsque le groupe R est inséré.

### Recommandation n° 4

L'IRSN recommande qu'EDF réalise, dans le cadre des essais physiques à puissance nulle de la campagne 24 du réacteur N° 2 de Paluel :

- une mesure supplémentaire par dilution ou par échange de l'efficacité intégrale d'un groupe de grappes de commande situé en périphérie du cœur (SA ou SB) ;
- une analyse comparative des écarts de résultats entre les méthodes de mesure de l'efficacité des groupes (PDG et dilution/échange), en tenant compte des sources d'écarts inhérentes aux spécificités de ces méthodes. Cette analyse portera également sur les courbes d'efficacité intégrale des groupes.

Pour le cas où la méthode PDG ne serait pas applicable, EDF vérifiera la conformité des efficacités neutroniques des groupes avec une autre méthode.

### Recommandation n° 5

Au cours de la campagne 24 du réacteur N° 2 de Paluel, l'IRSN recommande qu'EDF réalise :

- une analyse comparative des écarts entre les courbes des efficacités différentielles calculées et expérimentales du groupe R avec les écarts constatés en gestion de combustible GEMMES et vérifie le conservatisme de l'incertitude de calcul de l'efficacité différentielle maximale de ce groupe ;
- une analyse des écarts entre les valeurs calculées et mesurées de l'axial-offset lors de chaque carte de flux prescrite par le chapitre X des règles générales d'exploitation, y compris celles réalisées lors de l'essai d'oscillation axiale de puissance.

EDF évaluera les conséquences d'une éventuelle perte de représentativité de la distribution axiale de puissance sur la démonstration de sûreté.

### **Recommandation n° 6**

L'IRSN recommande qu'EDF réalise au cours de de la campagne 24 du réacteur N° 2 de Paluel :

- des mesures supplémentaires de concentration en bore du circuit primaire afin de vérifier le respect de l'incertitude de calcul de la concentration en bore en fin de cycle lors de la disparition du gadolinium ;
- des essais de cartes de flux supplémentaires avec des grappes insérées au voisinage de leur insertion limite en début, milieu et fin de campagne. EDF exploitera le REX des cartes de flux (toutes grappes extraites, grappes insérées) réalisées lors de cette campagne afin de vérifier le respect des valeurs de conception des incertitudes de calcul de la distribution de puissance considérées dans la démonstration de sûreté.

### **Recommandation n° 7**

En cas de non-respect de la périodicité des essais physiques de cartes de flux au cours de la campagne 24 du réacteur N° 2 de Paluel, l'IRSN recommande qu'EDF apporte des éléments permettant de justifier l'applicabilité de la conduite à tenir du chapitre X des RGE prévue à cet effet.

### **Recommandation n° 8**

Afin de vérifier le bon dimensionnement des hypothèses génériques utilisées par le système de protection intégré numérique en lien avec la reconstruction de la distribution de puissance dans le cœur, l'IRSN recommande qu'EDF réalise, lors de la 24<sup>ème</sup> campagne du réacteur N° 2 de Paluel, des essais de cartes de flux à différents niveaux de puissance et pour différentes configurations de grappes (toutes grappes extraites, grappes insérées). Les insertions limites des groupes devront être respectées lors de ces essais.

## ANNEXE 2 À L'AVIS IRSN N° 2020-00208 DU 18 DÉCEMBRE 2020

### Observations de l'IRSN

#### Observation n° 1

L'IRSN estime qu'EDF devrait transmettre, dans les meilleurs délais, les éléments de validation des bibliothèques de données neutroniques considérées pour les assemblages de réserve de gestion composant le plan de chargement de la campagne 24 du réacteur N° 2 de Paluel afin d'évaluer la sûreté et interpréter les essais physiques.

#### Observation n° 2

L'IRSN estime qu'EDF devrait :

- transmettre l'analyse du REX GEMMES permettant d'évaluer le risque d'apparition d'une anomalie de la distribution de puissance en cours de campagne ;
- préciser la méthodologie d'analyse des cartes de flux prévues lors des essais physiques de la campagne 24 du réacteur N° 2 de Paluel afin de détecter ce type d'anomalie ainsi que la conduite à tenir, le cas échéant.

Ces informations devraient être fournies dans les meilleurs délais.

#### Observation n° 3

L'IRSN estime qu'EDF devrait apporter des éléments permettant de justifier le bon comportement des chambres à fission mobile neuves du système RIC lors des essais physiques de cartes de flux qui seront réalisées lors de la campagne 24 du réacteur N° 2 de Paluel.

## **ANNEXE 3 À L'AVIS IRSN N° 2020-00208 DU 18 DÉCEMBRE 2020**

### **Engagements principaux de l'exploitant**

#### **Engagement n° 1**

Pour la campagne 24 du réacteur N° 2 de Paluel, EDF vise désormais une teneur en hydrogène dissous supérieure ou égale à 20 ml/kg TPN lors du conditionnement chimique du milieu primaire en AN/GV arrêt à chaud.

#### **Engagement n° 2**

Pour ce qui concerne la chimie, EDF examine les dispositions supplémentaires nécessaires relatives en amont des prochains RGV du palier de 1300 MWe. Les modalités de pérennisation de ces dispositions relatives à la chimie seront définies pour la fin de l'année 2021.

#### **Engagement n° 3**

EDF s'engage à transmettre :

- à l'échéance de fin mars 2021, des éléments de validation du calcul de la réactivité et de la distribution radiale de puissance lorsque toutes les grappes sont extraites avec sa chaîne de calcul neutronique en s'appuyant sur des calculs de référence Monte-Carlo. EDF étudiera également l'influence du choix de la bibliothèque de données nucléaires sur les résultats des calculs Monte-Carlo.
- à l'échéance de fin mai 2021, des éléments de validation du calcul de la réactivité et de la distribution radiale de puissance lorsque certains groupes de grappes sont complètement insérés (groupes R et G1) avec sa chaîne de calcul neutronique en s'appuyant sur des calculs de référence Monte-Carlo.