



Fontenay aux roses, le 3 février 2023

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

AVIS IRSN N° 2023-00018

Objet : EDF – REP – Redémarrage d'un réacteur après fonctionnement prolongé à puissance intermédiaire.

Réf. : [1] Lettre ASN – CODEP-DCN-2022-061320 du 14 décembre 2022.
[2] Lettre ASN – CODEP-DCN-2019-016741 du 11 avril 2019.
[3] Lettre ASN – CODEP-CHA-2018-048940 du 10 octobre 2018.
[4] Lettre ASN – CODEP-CAE-2021-014248 du 23 mars 2021.

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 la démarche générique, proposée par EDF, de prise en compte de l'impact d'un fonctionnement prolongé à puissance intermédiaire (FPPI¹) vis-à-vis du risque de rupture de gaine de crayon de combustible par interaction entre la pastille et la gaine² (IPG) à la suite d'un aléa interrompant la montée en puissance (MEP) d'un réacteur nucléaire lors du redémarrage après un arrêt pour rechargement du combustible (APR) ou après un arrêt en cours de cycle.

1. CONTEXTE

Lors du redémarrage des réacteurs après APR ou après un arrêt en cours de cycle, la montée en puissance est parfois interrompue par des aléas d'exploitation conduisant à maintenir le réacteur en FPPI de manière prolongée. Or ce type de fonctionnement est défavorable au regard du risque IPG et, en conséquence, sa durée est limitée. Sa durée, régie par le crédit K, est limitée dans les spécifications techniques d'exploitation (STE). Ce crédit K est représentatif des marges de sûreté vis-à-vis du risque IPG. Il est initialisé au redémarrage à une valeur

¹ Le FPPI est un fonctionnement du réacteur dont la puissance est comprise entre 2 % et 92 % Puissance Maximale Disponible en l'absence d'indisponibilité (PMD) sur une durée supérieure à 8 heures sur 24 heures glissantes.

² 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 des gaines des crayons de combustible doit être démontrée pour toutes les conditions de fonctionnement de dimensionnement de catégories 1 (fonctionnement normal) et 2 (fonctionnement incidentel).

de 100³ après une phase de reconditionnement⁴ du combustible, à savoir un fonctionnement de plus de trois jours à 100 % de la puissance nominale (% Pn) ou de plus de 100 h en base si le réacteur est en perte de performance. La valeur du crédit K est ensuite suivie tout au long du cycle d'irradiation selon des lois de croissance et de décroissance issues des résultats des études IPG de conception en conditions de fonctionnement de catégorie 2⁵ du rapport de sûreté (RDS). Le crédit K doit rester supérieur à une valeur limite définie dans les STE. En revanche, en l'état actuel du référentiel, le crédit K n'est pas suivi lors de la première montée en puissance, après APR. De plus, les STE ne précisent pas les conditions d'initialisation du crédit K dans le cadre d'un redémarrage après arrêt en cours de cycle.

En novembre 2006, EDF a fixé, de manière conventionnelle, à 10 jours la durée maximum autorisée de première montée en puissance.

Le retour d'expérience (REX) d'exploitation d'EDF a mis en évidence que certains réacteurs ont interrompu leur première montée en puissance après APR du fait d'événements fortuits. D'autres réacteurs ont présenté, au cours d'un cycle d'irradiation ou lors de la phase de remontée en puissance après redémarrage du réacteur en cours de cycle, un risque de dépassement du crédit K autorisé à la suite d'un FPPI de longue durée. Ainsi, l'ASN a demandé à EDF par la lettre citée en référence [2] de lui transmettre une stratégie de remontée en puissance d'un réacteur à la suite d'une exploitation du réacteur avec un FPPI de longue durée ou après un déconditionnement du combustible notable en veillant à prendre en compte les situations pour lesquelles la remontée en puissance est susceptible de rencontrer des aléas d'exploitation.

En réponse à cette demande ASN, EDF a transmis une démarche générique relative au traitement du FPPI vis-à-vis du risque IPG en cas d'aléas au redémarrage après rechargement. Par ailleurs, EDF propose de valoriser différents leviers afin de restaurer des marges en cas de faibles durées de FPPI de la première montée en puissance ou en cours de cycle (cf. §4). Enfin, EDF limite à 40 jours la durée maximale autorisée de FPPI au démarrage.

Ainsi, par la lettre citée en première référence, l'ASN sollicite l'avis de l'IRSN sur l'acceptabilité des éléments suivants :

- *la démarche générique proposée par l'exploitant pour définir les durées maximales de la première montée en puissance après rechargement en cas d'aléa et les conditions d'initialisation du crédit K associé ;*
- *les conditions d'initialisation du crédit K après un arrêt en cours de cycle dans le cas d'un déchargement suivi d'un rechargement du cœur à l'identique, ou de toute autre intervention ne modifiant pas le plan de chargement ;*
- *les solutions proposées par EDF pour restaurer des marges en cas de faibles durées de FPPI lors de la première montée en puissance après rechargement et en cas de dépassement des durées FPPI autorisées par les STE en cours de cycle ou lors de la phase de remontée en puissance après redémarrage du réacteur en cours de cycle.*

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

³ Cette valeur correspond au fonctionnement en suivi de charge et télé réglage (SCTR), fonctionnement le plus pénalisant vis-à-vis du risque IPG.

⁴ Lors du retour en puissance (après un FPPI) entraînant la dilatation de la pastille, le contact entre la pastille et la gaine s'établit de nouveau. Si le temps de maintien à ce niveau de puissance élevé est suffisamment important, la déformation imposée par la pastille à la gaine génère des contraintes relativement élevées. La relaxation de ces contraintes au cours du temps produit des marges en contrainte IPG. Le déconditionnement du combustible est alors progressivement « gommé » au cours du maintien en puissance : c'est la phase de reconditionnement du combustible.

⁵ L'intégrité des gaines des crayons de combustible (première barrière de confinement) doit être démontrée pour toutes les conditions de fonctionnement de dimensionnement de catégories 1 (fonctionnement normal) et 2 (fonctionnement incidentel). Les transitoires de catégorie 2 correspondent à des situations incidentelles de fréquence modérée (fréquence d'apparition annuelle par réacteur supérieure à 10⁻²).

2. DÉMARCHE GÉNÉRIQUE PROPOSÉE PAR EDF

À la suite du constat de l'interruption fréquente de la montée en puissance après un arrêt pour rechargement du combustible (hors essais programmés), EDF a proposé une démarche générique consistant à déterminer les durées maximales de première montée en puissance (D0), acceptables vis-à-vis du risque IPG en cas d'aléa au démarrage après rechargement du cœur ainsi que les conditions d'initialisation du crédit K associé.

De plus, EDF a réalisé au cours de l'expertise des études visant à démontrer, sur un cas illustratif de la gestion de combustible Parité MOX à l'état VD4 (quatrième visite décennale), le conservatisme de la démarche générique. L'analyse de l'IRSN de ces études montre que la démarche générique n'est pas toujours conservatrice vis-à-vis de la détermination des durées maximales D0 autorisées au démarrage en tenant compte de la variabilité des recharges et d'un FPPI survenant en fin de prolongation de cycle de la campagne précédente (fonctionnement autorisé dans les STE).

Toutefois, dans la mesure où EDF limite à 40 jours cette durée D0, l'IRSN estime que ces sous-conservatismes sont couverts pour les gestions de combustible Parité MOX à l'état VD4, CYCLADES⁶ à l'état VD4, ALCADE⁷ à l'état VD2 présentant des D0, obtenues avec la démarche générique, bien supérieures à cette limite. Or ce n'est pas le cas des gestions de combustible GEMMES⁸ à l'état VD2 et VD3, GARANCE⁹ VD3 et Parité MOX à l'état VD3, cette dernière tenant compte de la variabilité des recharges. **Ainsi, l'IRSN estime que la robustesse de cette démarche générique pour déterminer la durée D0 n'est pas acquise pour toutes les gestions de combustible.**

Concernant les gestions de combustible GEMMES à l'état VD2 et VD3 et GARANCE à l'état VD3, EDF a accepté, en fin d'expertise, de limiter la durée maximale de FPPI à 10 jours calendaires en première montée en puissance après arrêt pour rechargement. **Ceci n'appelle plus de remarque de la part de l'IRSN.**

Concernant la gestion de combustible Parité MOX à l'état VD3, EDF a apporté en fin d'expertise des justifications permettant de limiter la durée maximale de la première montée en puissance à 20 jours. **L'IRSN a estimé ces justifications acceptables.**

Pour ce qui concerne les gestions de combustible GEMMES à l'état VD2 et VD3, GARANCE à l'état VD3, et Parité MOX à l'état VD3, EDF se laisse la possibilité d'étendre à ces gestions la réalisation de calculs de robustesse pour lever les réserves techniques de l'IRSN et ainsi augmenter la durée D0 pour la première montée en puissance. **L'IRSN estime cette stratégie acceptable sur le principe.**

Enfin, EDF détermine en se basant sur les règles générales d'exploitation (RGE), soit la durée minimale de fonctionnement en base avant d'initialiser le crédit K à 100, soit la valeur d'initialisation du crédit K après trois jours de fonctionnement en base, **ce que l'IRSN estime acceptables.**

3. CONDITIONS D'INITIALISATION DU CRÉDIT K APRÈS UN ARRÊT EN COURS DE CYCLE

En cas d'aléas d'exploitation au cours du cycle d'irradiation, les réacteurs peuvent être amenés à se replier et à décharger le combustible. Lors du redémarrage du réacteur, les conditions d'initialisation du crédit K ne sont actuellement pas mentionnées dans les STE. En cas de rechargement du cœur à l'identique, EDF prévoit de reconduire, dès le début de la montée en puissance après la divergence, les valeurs du crédit K évaluées avant

⁶ CYCLADES : **CY**cle Combustible Long pour **A**ugmenter la **D**isponibilité par **E**valuation de **S**ûreté (Réacteurs de 900 MWe – CP0).

⁷ ALCADE : **A**llongement des **C**ampagnes pour **A**méliorer **D**urablement l'**E**xploitation (Réacteurs de 1450 MWe).

⁸ GEMMES : **G**estion des **É**volutions et des **M**odifications des **M**odes d'**E**xploitation en **S**ûreté (Réacteurs de 1300 MWe).

⁹ GARANCE : **G**estion **A**vancée des **REP** avec **A**daptation aux **N**ouveaux **C**œurs **E**nvisagés (Réacteurs de 900 MWe – CPY).

l'arrêt du réacteur. Ainsi, le crédit K est initialisé à sa valeur avant arrêt et les marges IPG disponibles en exploitation sont régies par le suivi du crédit K.

Des demandes d'autorisation de modification similaires effectuées par EDF ont déjà été acceptées par l'ASN, respectivement pour le réacteur n° 1 de Nogent-sur-Seine en 2018 [3] et pour le réacteur n° 1 de Flamanville en 2021 [4]. En effet, le temps de fonctionnement à puissance faible (inférieure à 2 % Pn) ou lors des arrêts du réacteur a peu d'influence sur l'état du combustible, ainsi que sur son comportement lors du redémarrage du réacteur. Ces phases, quelles que soient leur durée, sont en conséquence sans impact sur les marges de sûreté vis-à-vis du risque IPG. **Aussi, l'IRSN estime acceptable la poursuite de la comptabilisation du crédit K à sa valeur obtenue avant l'arrêt du réacteur, dès la montée en puissance après le rechargement du cœur à l'identique. Aucune réinitialisation après un fonctionnement à PMD n'est donc nécessaire.** Par ailleurs, EDF a indiqué, en cours d'expertise, que les STE seront modifiées pour prendre en compte les modalités d'initialisation du crédit K après arrêt en cours de cycle avec un plan de chargement identique, **ce que l'IRSN estime acceptable.**

Enfin, en cas de modification du plan de chargement après un arrêt en cours de cycle, l'IRSN prend note qu'EDF réalisera une étude spécifique vis-à-vis du risque IPG.

4. SOLUTIONS POUR RESTAURER DES MARGES VIS-À-VIS DU RISQUE IPG

EDF propose des solutions pour restaurer des marges IPG en cas de faibles durées D0 de FPPI. Ces solutions concernent :

- la prise en compte du profil réel de puissance du réacteur ;
- la valorisation de la performance du matériau de gainage M5 par rapport au gainage Zy-4 ;
- la pénalisation des chaînes de protection pour les réacteurs de 900 et 1300 MWe suivie de modalités de fonctionnement du réacteur pour revenir à une situation normale après résolution de l'aléa.

Concernant ce dernier levier, EDF a précisé en cours d'expertise que, pour la première montée en puissance, le délai de maintien à une puissance élevée n'est pas basé sur le fonctionnement reconditionnant le plus pénalisant parmi les différents modes de fonctionnement du réacteur (soit en base, en réglage primaire de fréquence ou en télé-réglage). En conséquence, EDF prévoit de mettre à jour sa démarche générique afin de tenir compte du mode de reconditionnement du combustible le plus pénalisant afin d'évaluer la durée à un niveau de puissance élevé permettant de restaurer des marges IPG, avant la levée de la pénalisation des protections et avant l'initialisation du crédit K lors de la première montée en puissance. **Ceci n'appelle plus de remarque de la part de l'IRSN.**

Concernant les leviers pour restaurer des marges vis-à-vis du risque IPG, l'IRSN considère toutes ces solutions acceptables, individuellement ou de manière cumulée. À noter néanmoins que le profil réel de puissance est suivi en exploitation par un logiciel affecté par des événements significatifs pour la sûreté (ESS). À cet égard, l'IRSN souligne l'importance qu'EDF vérifie l'efficacité des actions menées pour rendre robuste le suivi du profil réel de puissance par ce logiciel.

Ainsi, ces solutions permettent d'augmenter significativement la durée maximale de FPPI afin de permettre la résolution d'aléas rencontrés lors de la première montée en puissance après rechargement. Ils permettent également de gérer les dépassements de la valeur du crédit K autorisée par les STE à la suite d'un FPPI de longue durée au cours d'un cycle d'irradiation et après rechargement à l'identique. Toutefois, EDF a spécifié que le gain apporté par ces solutions ne conduira pas à dépasser la durée limite de 40 jours pour la phase de redémarrage après rechargement. De plus, **l'IRSN estime qu'EDF doit veiller à ce que les jours de FPPI supplémentaires obtenus par ces solutions ne soient pas totalement consommés pour gérer l'aléa afin de permettre la remontée du réacteur à un palier de puissance reconditionnant le combustible.**

Enfin, l'IRSN estime qu'EDF devrait mettre à jour la note présentant la démarche générique pour tenir compte des évolutions apportées au cours de l'expertise, et notamment intégrer les valeurs des gains obtenues par les leviers et susceptibles d'être appliquées par les sites. **Ceci fait l'objet de l'observation figurant en annexe.**

5. CONCLUSION

Compte tenu des éléments apportés par EDF au cours de l'expertise, l'IRSN estime acceptables :

- les durées maximales de la première montée en puissance après arrêt pour rechargement en cas d'aléa (en l'absence de valorisation de leviers) retenues en fin d'expertise par EDF, à savoir :
 - 40 jours pour les gestions de combustible Parité MOX à l'état VD4, CYCLADES à l'état VD4, ALCADE à l'état VD2,
 - 10 jours pour les gestions de combustible GEMMES à l'état VD2 et VD3 et GARANCE à l'état VD3,
 - 20 jours pour la gestion de combustible Parité MOX à l'état VD3 ;
- les conditions d'initialisation du crédit K lors de la première montée en puissance après rechargement et après un arrêt en cours de cycle dans le cas d'un déchargement suivi d'un rechargement du cœur à l'identique ou de toute autre intervention ne modifiant pas le plan de chargement ;
- les solutions proposées par EDF pour restaurer des marges en cas de faibles durées de FPPI lors de la première montée en puissance après rechargement (dans la limite des 40 jours), en cas de dépassement des durées FPPI autorisées par les STE en cours de cycle ou lors de la phase de remontée en puissance après redémarrage de la tranche en cours de cycle.

L'IRSN estime néanmoins qu'EDF devrait mettre à jour la note présentant la démarche générique pour tenir compte des évolutions apportées au cours de l'expertise et intégrer les valeurs des gains obtenues par les leviers et susceptibles d'être appliquées par les sites.

IRSN

Le Directeur général

Par délégation

Hervé BODINEAU

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté

ANNEXE À L'AVIS IRSN N° 2023-00018 DU 3 FEVRIER 2023

Observation de l'IRSN

L'IRSN estime qu'EDF devrait mettre à jour la note présentant la démarche générique pour tenir compte des évolutions apportées au cours de l'expertise, et notamment intégrer les valeurs des gains obtenues par les leviers et susceptibles d'être appliquées par les sites.