

Fontenay-aux-Roses, le 22 mai 2017

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

Avis IRSN/2017-00168

Objet : Critères de tenue du combustible des réacteurs à eau sous pression

- Réf.
1. Lettre ASN - CODEP-DCN-2017-003555 du 1^{er} février 2017.
 2. Lettre ASN - CODEP-DCN-2011-013376 du 2 mai 2011.
 3. Lettre ASN - CODEP-DCN-2014-032737 du 24 juillet 2014.
 4. Lettre ASN - CODEP-DCN-2014-007597 du 13 février 2014.
 5. Lettre ASN - DGSNR-SD2 n° 0201/2005 du 2 août 2005.
 6. Lettre ASN - Dep-DCN-0633-2008 du 23 décembre 2008.

Dans les réacteurs à eau sous pression (REP), les assemblages de combustible constituent le cœur du réacteur dans lequel se déroule la fission nucléaire qui produit l'énergie.

Un assemblage de combustible pour les réacteurs du parc électronucléaire d'EDF se compose de 264 crayons¹ de combustible arrangés en réseau à maille carrée. Un crayon de combustible est constitué d'une gaine métallique en alliage de zirconium, d'une hauteur d'environ quatre mètres et d'un diamètre de l'ordre d'un centimètre, dans laquelle sont empilées des pastilles² d'oxyde d'uranium (UO₂) ou d'oxyde d'uranium et de plutonium (MOX³). La gaine des crayons de combustible est ainsi la première barrière séparant la matière radioactive de l'environnement.

Ces crayons s'insèrent dans une structure comprenant, selon la puissance du réacteur, huit ou dix grilles⁴ qui assurent l'espacement des crayons. Les grilles sont solidaires de 24 tubes-guides dans lesquels peuvent coulisser les crayons neutroniquement absorbants des grappes de commande permettant de piloter la réactivité du cœur. L'espacement des crayons de combustible permet la circulation de l'eau entre eux et donc l'évacuation hors du cœur de l'énergie produite.

Adresse Courrier
BP 17
92262 Fontenay-aux-Roses
Cedex France

Siège social
31, av. de la Division Leclerc
92260 Fontenay-aux-Roses
Standard +33 (0)1 58 35 88 88
RCS Nanterre 8 440 546 018

¹ 265 dans le cas de l'EPR Flamanville 3.

² Une pastille d'oxyde est un matériau céramique, de forme cylindrique. Sa hauteur et son diamètre sont de l'ordre d'un centimètre.

³ MOX : Mixed Oxide Fuel (combustible mixte UO₂ + PuO₂).

⁴ Une grille est constituée de plaquettes soudées entre elles qui forment un réseau à pas carré de 17x17 cellules dans lesquelles sont insérés les crayons de combustible. Ces plaquettes (hormis celles situées en périphérie de la grille) sont munies d'ailettes de mélange pour favoriser le mélange de l'eau du circuit primaire qui circule autour des crayons.

Les études déterministes des conditions de fonctionnement de référence visent à démontrer, selon une approche prudente, le respect de critères techniques d'acceptation relatifs au comportement de cette première barrière, et plus généralement du combustible. Ces critères techniques portent sur des grandeurs représentatives des phénomènes physiques limitatifs, accessibles par le calcul ou mesurables dans le réacteur. Les valeurs limites sont déterminées sur la base d'expérimentations représentatives des situations rencontrées dans les conditions de fonctionnement de référence. Ces critères sont d'autant plus sévères que la fréquence estimée des conditions de fonctionnement est élevée. Ces dernières sont classées en quatre catégories comprenant le fonctionnement normal (catégorie 1), les transitoires incidentels (catégorie 2), les transitoires accidentels de fréquence modérée (catégorie 3) et enfin les transitoires accidentels hypothétiques (catégorie 4). Une grande partie des critères retenus est issue du référentiel de sûreté américain datant des années 1970. Si certains compléments ont été apportés, notamment pour tenir compte des évolutions de conditions d'exploitation des réacteurs, la majorité d'entre eux n'ont pas été revus depuis la conception du parc électronucléaire d'EDF, à l'exception de ceux concernant l'accident de perte de réfrigérant primaire⁵ (APRP) qui ont évolué à la suite de l'examen mené en 2010 [2] et en 2014 [3] visant à prendre en compte l'état des connaissances sur le sujet.

L'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a demandé que soit réalisé un réexamen ciblé de la pertinence des exigences et critères relatifs à la tenue du combustible et a sollicité, par lettre en référence [1], l'avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur :

- l'exhaustivité et la pertinence des critères actuellement retenus pour les conditions de fonctionnement de catégories 1 à 4, afin de compléter, si besoin, la démonstration de sûreté ;
- l'adéquation entre les phénomènes physiques mis en jeu et les exigences⁶ associées, sur la base des objectifs⁷ de tenue de la première barrière actuellement retenus pour les accidents des catégories 1 à 4 ;
- la cohérence entre les phénomènes physiques pris en compte dans les études d'accidents et les hypothèses des études de leurs conséquences radiologiques.

Sur la base des éléments fournis par EDF (résultats d'essais, études, retour d'expérience, examens de crayons irradiés...), l'IRSN a examiné, compte tenu de l'état des connaissances et des conditions d'exploitation des réacteurs, l'adéquation et l'exhaustivité des critères techniques d'acceptation actuels et la suffisance des évolutions prévues par EDF. Cet examen concerne les différents phénomènes physiques redoutés :

- la fragilisation des gaines par la corrosion ;
- le risque de rupture de la gaine par l'interaction entre la pastille et la gaine ;
- les conséquences du passage en crise d'ébullition et du risque associé de dispersion de fragments de pastilles de combustible dans le circuit primaire ;
- la fusion des pastilles de combustible.

Par ailleurs, l'état réel des réacteurs en fonctionnement doit être pris en compte dans la démonstration de sûreté. Deux phénomènes concernant l'état prévisible du combustible sont ainsi à traiter. D'une part, les assemblages de combustible se déforment latéralement de plusieurs millimètres pendant leur irradiation en cœur. D'autre part,

⁵ L'APRP est l'accident retenu pour le dimensionnement des équipements de sauvegarde d'un REP. Il correspond à la rupture d'une tuyauterie principale du circuit primaire.

⁶ Des exigences sont associées aux différents phénomènes physiques susceptibles de mettre en cause les objectifs. Par exemple, l'exigence d'absence de crise d'ébullition en transitoire de catégorie 2 contribue à garantir l'intégrité de la première barrière.

⁷ Pour chaque catégorie de conditions de fonctionnement de référence, des objectifs sont définis en termes de tenue des barrières de confinement (la gaine des crayons, le circuit primaire, l'enveloppe de confinement), d'évacuation de la puissance résiduelle et de maîtrise de la réactivité.

certaines crayons de combustible peuvent perdre leur étanchéité en fonctionnement, soit à cause de la présence d'un corps migrant⁸ dans le circuit primaire, soit à cause d'un défaut de conception ou de fabrication. Ces pertes d'étanchéité sont relativement rares dans les réacteurs d'EDF et sont généralement détectables en fonctionnement. Néanmoins, elles n'induisent pas l'arrêt immédiat du réacteur sauf en cas de non-respect des limites radiochimiques concernant la contamination du circuit primaire principal. Sur ces deux sujets, EDF a réalisé des études qui ont été analysées par l'IRSN.

Enfin, l'IRSN a analysé la cohérence entre le comportement du combustible dans les conditions de fonctionnement de référence et les hypothèses des études des conséquences radiologiques correspondantes.

Il est à noter que l'instruction menée n'a pas concerné les critères de tenue du combustible spécifiques à l'APRP qui ont été examinés en 2010 [2] et en 2014 [3]. De même, le réexamen réalisé ne traite pas des assemblages de combustible utilisant une gaine de crayon en alliage *Zircaloy-4*⁹, dans la mesure où de tels assemblages ne sont plus introduits dans les REP en France depuis fin 2016.

L'analyse de l'IRSN s'appuie sur les éléments techniques transmis par EDF en réponse à la lettre de l'ASN en référence [4]. Les conclusions de l'IRSN tiennent également compte des engagements pris par EDF au cours de l'instruction, qu'il devra confirmer à l'ASN, et dont les principaux sont mentionnés dans le présent avis.

Pour ce qui concerne la mise en application des évolutions du référentiel relatif à la tenue du combustible des REP résultant de cette analyse, l'ASN a précisé [4] que « *l'application pourra être différenciée selon le degré d'aboutissement des conclusions [...], l'importance et l'urgence du sujet* ». Il est à noter que la plupart des analyses et des conclusions du présent avis s'appliquent au réacteur EPR Flamanville 3.

Référentiel de sûreté en vigueur

En fonctionnement normal (catégorie 1) et en cas de transitoires incidentels (catégorie 2), l'intégrité des crayons de combustible, et notamment de leur gaine, ne doit pas être mise en cause. À la conception des REP, deux phénomènes susceptibles d'affecter cette intégrité ont été retenus pour dimensionner les systèmes de protection du réacteur :

- la « crise d'ébullition », caractérisée par l'apparition d'un film de vapeur entourant la gaine, dégrade son refroidissement et conduit à sa montée rapide en température. Elle intervient si le flux thermique à la paroi de la gaine dépasse un flux dit « critique » ;
- la fusion au centre de la pastille, qui intervient si la puissance linéique dans le combustible est trop élevée.

Pour ces phénomènes, deux exigences ont été définies dès la conception : l'absence de crise d'ébullition et l'absence de fusion à cœur de la pastille.

Un troisième risque de perte d'intégrité du gainage a été mis en évidence plus récemment : il s'agit de la combinaison des contraintes mécaniques exercées sur la gaine par la pastille et de l'effet corrosif de certains produits de fission contenus dans le crayon, appelée Interaction pastille-gaine assistée par la corrosion sous contraintes (IPG-CSC). La vérification de l'absence de risque de rupture de gaine par IPG-CSC a ainsi été ajoutée.

⁸ Un corps migrant est un fragment le plus souvent métallique, de petite taille (inférieure à trois millimètres), qui s'est généralement détaché ou a été arraché d'une pièce de taille plus importante lors de l'exploitation du réacteur, par exemple lors de la manutention des assemblages.

⁹ Cet alliage, utilisé depuis la conception des REP, est progressivement remplacé depuis quelques années par des alliages plus performants en termes de résistance à la corrosion, suite à l'ajout d'éléments tel que le Niobium. Ces alliages sont, pour les assemblages de combustible conçus par l'industriel AREVA, le *M5*[®] et, pour les assemblages conçus par Westinghouse, le *ZIRLO* et l'*Optimized ZIRLO*.

Pour s'assurer de l'absence de risque de rupture par les trois phénomènes mentionnés ci-dessus, des critères techniques d'acceptation ont été définis (pour éviter la crise d'ébullition, le rapport de flux thermique critique¹⁰ doit rester supérieur à une certaine valeur ; pour éviter la fusion, la puissance linéique doit rester inférieure à un certain seuil ; pour éviter la rupture par IPG-CSC, certaines limites thermomécaniques doivent être respectées).

Par ailleurs, des critères de conception des crayons de combustible ont été retenus pour s'assurer de leur bon comportement en conditions de fonctionnement de catégories 1 et 2 concernant l'oxydation des gaines en fonctionnement normal et le risque d'interaction mécanique entre la pastille et la gaine (ImPG) pour les transitoires conduisant à une dilatation thermique des pastilles de combustible plus importante que celle des gaines.

Dans les conditions de fonctionnement de référence de catégories 3 et 4, l'intégrité des gaines peut être mise en cause, mais le nombre de crayons endommagés dans le cœur doit rester limité et la capacité de refroidissement du cœur doit rester assurée. Par exemple, la dispersion de fragments de pastilles de combustible dans le réfrigérant en cas d'accident avec rupture de gaine étant susceptible d'affecter la capacité de refroidissement du cœur, une exigence de non-dispersion a été définie pour l'accident d'éjection de grappe dès la conception des REP, puis pour l'accident d'APRP en 2014, et des critères techniques d'acceptation doivent être vérifiés dans les études correspondantes. De plus, les dommages sur le combustible doivent être limités en catégorie 3, mais peuvent être plus importants en catégorie 4. Par exemple, le nombre de crayons du cœur susceptibles de subir une crise d'ébullition est limité à 5 % en catégorie 3 contre 10 % en catégorie 4.

Enfin, de manière générale, les conséquences radiologiques des accidents sont calculées de manière cohérente avec les études des transitoires accidentels correspondants. Par exemple, les études des conséquences radiologiques des accidents de catégorie 3 (respectivement catégorie 4) considèrent 5 % (respectivement 10 %) de crayons du cœur rompus.

Critères relatifs à la corrosion des gaines

Dans un REP, les gaines du crayon de combustible en alliage de zirconium sont oxydées progressivement par l'eau du circuit primaire. La réaction d'oxydation conduit à une prise d'hydrogène dans le métal de la gaine qui la fragilise. La vitesse de corrosion des gaines dépend de leur température.

En fonctionnement normal, la température de la paroi de la gaine étant d'environ 350 °C, la corrosion est assez lente. Un critère limitant l'épaisseur de la couche d'oxyde à 100 µm était jusqu'à présent retenu. Compte tenu des performances en termes de résistance à la corrosion des alliages de gaine dorénavant utilisés (*M5*[®], *ZIRLO* et *Optimized ZIRLO*), il n'est plus nécessaire, pour ces gainages, de vérifier cette limite. Néanmoins, la prise d'hydrogène dans le métal associée à l'oxydation pendant l'irradiation a un impact sur la tenue de la gaine dans certaines conditions de fonctionnement. La validité des critères de tenue mécanique des gaines dans ces conditions repose donc sur le respect d'une teneur maximale en hydrogène (voir ci-dessous).

En transitoires incidentels (catégorie 2), une limite de température à l'interface entre le métal de la gaine et l'oxyde formé, en l'occurrence 425 °C, était jusqu'à présent retenue pour s'assurer de l'absence d'accélération de la corrosion du gainage. Cependant, EDF a démontré que ce phénomène n'est pas susceptible de se produire pour les alliages de gaine dorénavant utilisés compte tenu de leurs performances en termes de résistance à la corrosion et des températures susceptibles d'être atteintes en transitoires de catégorie 2. La vérification de ce critère n'est donc plus nécessaire. En cas de mise en œuvre d'un nouvel alliage, EDF s'est engagé à vérifier, à partir d'essais, que son comportement est bien similaire à celui des alliages précités.

¹⁰ Rapport entre le flux critique (valeur du flux conduisant à la crise d'ébullition) et le flux thermique à la paroi.

En transitoires accidentels de catégories 3 et 4, les températures de gaine susceptibles d'être atteintes sont plus élevées. Lorsque la gaine du crayon de combustible est à haute température (au-delà de 900 °C environ), entourée par un film de vapeur suite à l'entrée en crise d'ébullition, elle s'oxyde et est fragilisée. Cela entraîne un risque de rupture du crayon lors de la phase de refroidissement brutal consécutive à la fin de la crise d'ébullition. La limite actuelle en température de gaine (1482 °C) ne tient pas compte du temps passé par la gaine à haute température, dont dépendent pourtant son taux d'oxydation et sa résistance mécanique. À partir d'une analyse des essais expérimentaux disponibles dans la littérature, EDF a complété cette limite en retenant un critère dépendant du taux d'oxydation et de la température maximale atteinte par la gaine. L'IRSN estime que, si le principe de cette démarche est acceptable, EDF n'a tenu compte, ni de manière exhaustive des phénomènes physiques fragilisant les gaines dans les situations considérées, ni des incertitudes de mesure ayant permis de définir le taux d'oxydation limite. EDF s'est engagé à compléter sa démarche et à réévaluer le taux d'oxydation limite défini.

Critères relatifs à l'interaction entre la pastille et la gaine

L'interaction entre la pastille et la gaine (IPG) peut conduire à la rupture de cette dernière pour les transitoires conduisant à une dilatation thermique des pastilles de combustible plus forte que celle du gainage. La sollicitation peut être purement mécanique (ImPG) sous l'effet des contraintes appliquées à la gaine par la pastille ou assistée par la Corrosion sous contrainte (IPG-CSC) due à certains produits de fission corrosifs présents dans les crayons irradiés. La revue menée a montré que l'un ou l'autre de ces modes de rupture n'est pas traité dans certaines études d'accidents et que certains critères nécessitent d'être complétés.

Le risque de rupture de gaine par IPG-CSC est actuellement pris en compte dans l'étude des transitoires de catégorie 2 pour lesquels l'intégrité des gaines doit être démontrée. Cependant, certains transitoires de catégorie 3 ou 4 conduisent également à des sollicitations des gaines par IPG-CSC. Si le mode de rupture correspondant (perçement sans risque de dispersion de combustible) n'est pas de nature à entraîner un risque de perte de la capacité de refroidissement du cœur, le risque doit néanmoins être évalué pour les transitoires de catégorie 3 et 4 afin de s'assurer que les conséquences radiologiques de ces accidents sont évaluées de manière enveloppe. À cet égard, EDF a établi une démarche pour vérifier l'absence de risque de rupture de gaine en transitoire de retrait incontrôlé d'une grappe de commande en puissance (R1GP, transitoire classé en catégorie 3) et a appliqué cette démarche à la gestion de combustible¹¹ Parité MOX. L'IRSN estime que la démarche est acceptable. EDF a également démontré que sa démarche couvre les autres gestions de combustible en vigueur, ce qui n'appelle pas de remarque de l'IRSN. Un autre transitoire, la rupture de tuyauterie vapeur initiée en puissance, classé en catégorie 4, est également susceptible de conduire à des ruptures de gaine par IPG-CSC. À cet égard, EDF a fourni, en fin d'instruction, un argumentaire concernant la gestion de combustible Parité MOX et a conclu que, en première approche, le risque de rupture par IPC-CSC n'est pas plus important que pour un transitoire de catégorie 2. L'IRSN prend note de cet argumentaire qui nécessite d'être conforté et étendu aux autres gestions de combustible.

Par ailleurs, certains transitoires de catégorie 2 conduisent à une rampe de puissance susceptible d'engendrer une rupture de gaine par ImPG. À cet égard, EDF relève la limite de déformation maximale de gaine garantissant son absence de rupture à 2 %, au lieu de 1 %, pour des teneurs en hydrogène des gainages inférieures à 250 ppm. De plus, le Retrait incontrôlé de groupe(s) de grappes de commande initié à puissance nulle (RIGZ) est un transitoire particulier de catégorie 2 conduisant à une excursion rapide de puissance générant également un risque de rupture

¹¹ Une gestion de combustible se caractérise par la nature du combustible (UO₂ ou MOX), le taux d'enrichissement en noyaux fissiles d'uranium 235 ou la teneur en noyaux fissiles de plutonium, le nombre d'assemblages de combustible neufs chargés à chaque cycle de fonctionnement du réacteur (gestion dite « par tiers » ou « par quart »), la durée de fonctionnement du réacteur entre deux rechargements successifs et le nombre de cycles effectués par les assemblages combustibles (trois ou quatre cycles).

par ImPG, qui n'était jusqu'à présent pas traité. EDF a défini une limite spécifique à 1 % pour la déformation plastique de la gaine pour garantir son absence de rupture lors de ce transitoire. L'IRSN estime que ces évolutions, basées sur une interprétation prudente de résultats d'essais, sont acceptables.

Pour ce qui concerne les critères relatifs au risque de rupture de gaine par ImPG en transitoire de catégorie 4 d'éjection de grappe¹² (EDG) et à ses conséquences, la limite actuelle en enthalpie maximale du combustible, fixée à 200 cal/g lorsque le taux de combustion moyen des assemblages est inférieur à 33 GWj/tU, est maintenue quel que soit le gainage et le type de pastille (UO₂ ou MOX). Cette limite garantit l'absence de dispersion de fragments de combustible chaud dans le circuit primaire et contribue donc à assurer la capacité de refroidissement du cœur. Pour les taux de combustion supérieurs à 33 GWj/tU, l'absence de dispersion de combustible ne peut pas être garantie en cas de rupture de gaine par ImPG, compte tenu de l'état des pastilles de combustible irradiées. EDF a donc défini des critères garantissant l'absence de rupture de gaine, tenant compte des performances des gainages :

- pour les crayons à gainages ZIRLO et Optimized ZIRLO avec des pastilles UO₂, une limite définie en termes de variation d'enthalpie maximale est associée à une limite en largeur minimale de pulse¹³. Cette limite est issue de l'analyse d'essais d'insertion de réactivité (RIA) réalisés dans le réacteur japonais NSRR et dans le réacteur français CABRI. La valeur retenue, correspondant à l'essai à variation maximale d'enthalpie parmi les essais n'ayant pas entraîné de rupture de gaine, n'a pas été mesurée, mais a été calculée à partir de mesures de l'énergie injectée dans le combustible et de l'épaisseur d'oxyde du gainage du crayon ayant fait l'objet de l'essai¹⁴. **La démarche d'EDF est acceptable, mais l'IRSN estime qu'EDF devra réévaluer la valeur retenue en tenant compte des incertitudes sur les données expérimentales affectant son calcul, ce qui fait l'objet de la recommandation n° 1 en annexe ;**
- pour les crayons à gainage M5 avec des pastilles UO₂, une limite a également été définie en termes de variation d'enthalpie maximale à partir de la même base d'essais de type RIA. EDF s'est engagé à lui associer une limite en largeur de pulse minimale, en cohérence avec la base expérimentale utilisée ;
- pour les crayons à gainage M5 avec des pastilles MOX, EDF a également défini une limite en termes de variation d'enthalpie maximale, qui est issue de la mise en œuvre d'une démarche, combinant des résultats d'essais et des simulations numériques, que l'IRSN estime complexe et difficilement justifiable. Finalement, EDF s'est engagé à s'appuyer, comme dans les deux cas précédents, sur une démarche de définition du critère fondée sur l'analyse des essais disponibles.

Ces critères sont définis sur la base d'essais de type RIA initiés à puissance nulle alors que la démonstration de sûreté doit couvrir tous les niveaux de puissance initiale. Pour l'EPR Flamanville 3, EDF a démontré, en utilisant une démarche basée sur la simulation avec un logiciel de l'effet des transitoires d'éjection de grappe sur le comportement du combustible, que les sollicitations les plus fortes sur la gaine sont issues de transitoires initiés à puissance nulle. Le dossier d'EDF de validation du logiciel de thermomécanique accidentelle utilisé a fait l'objet d'une analyse par l'IRSN, qui n'a pas remis en cause cette validation. Cette démonstration reste à décliner sur les autres réacteurs d'EDF.

¹² Le transitoire d'éjection de grappe de commande est l'accident d'insertion de réactivité (en anglais *Reactivity-Initiated Accident* ou RIA) dimensionnant les limites d'insertion des groupes de grappes de commande. L'apport rapide de réactivité dans le combustible au voisinage de la grappe éjectée est mesuré en variation d'enthalpie, exprimée en calorie par gramme de combustible.

¹³ Le transitoire hypothétique résultant d'une éjection de grappe dans un REP se caractérise par une augmentation brutale de la puissance lorsque le cœur est critique sous l'effet des seuls neutrons prompts (on parle de « prompt-criticité »). Cette augmentation est rapidement limitée par les contre-réactions neutroniques et la puissance décroît ensuite. Le pulse de puissance qui en résulte dure quelques dizaines de millisecondes.

¹⁴ L'augmentation d'enthalpie du combustible résulte de l'énergie injectée et des pertes thermiques, qui dépendent elles-mêmes de l'effet « isolant » de l'oxyde à la paroi de la gaine.

Enfin, de manière générale, les critères relatifs au risque de rupture de gaine par ImPG lors des transitoires ont été établis sur la base d'essais réalisés sur des échantillons de gaines en *Zircaloy-4*. Les types de gainage utilisés par EDF présentent des performances différentes en termes de corrosion pendant leur irradiation, mais le paramètre prépondérant fragilisant les gaines est, quel que soit leur type, la teneur en hydrogène absorbé par la gaine. Ces critères sont donc valables pour une teneur en hydrogène inférieure ou égale à celle des échantillons de gaine testés. Néanmoins, pour ces échantillons, l'épaisseur d'oxyde a été mesurée, mais pas la teneur en hydrogène. EDF l'a donc calculée, en utilisant une corrélation donnant la teneur en hydrogène en fonction de l'épaisseur d'oxyde. Cette corrélation a été établie à partir de peu de points de mesure, certains présentant un comportement inattendu, et EDF n'a tenu compte, ni des incertitudes de mesure, ni de la dispersion observée. Aussi, l'IRSN formule la recommandation n°2 en annexe.

Critères relatifs à la crise d'ébullition

La crise d'ébullition conduit à une augmentation brutale de la température de la gaine qui entraîne, soit son ballonnement et sa rupture éventuelle si, notamment, la pression à l'intérieur du crayon est supérieure à celle du circuit primaire, soit son placage (ou « *collapse* ») sur les pastilles dans le cas contraire.

En transitoires de catégorie 2, la crise d'ébullition doit être évitée. En transitoires de catégorie 3 (respectivement 4), limiter le nombre de crayons entrant en crise d'ébullition à 5 % des crayons du cœur (respectivement 10 %) permet de limiter l'endommagement du combustible et les conséquences radiologiques des accidents correspondants. Dans le référentiel de sûreté actuel, l'analyse des conséquences radiologiques considère comme rompu tout crayon de combustible entrant en crise d'ébullition au cours d'un transitoire accidentel.

EDF prévoit de remplacer le critère technique d'acceptation des études d'accidents portant sur le nombre de crayons entrant en crise d'ébullition (5 ou 10 % selon la catégorie) par un critère équivalent, mais portant sur le nombre de crayons ballonnés et rompus, en gardant les mêmes valeurs limites. En effet, parmi les crayons entrant en crise d'ébullition, seuls ceux qui ont une pression interne due aux gaz de fission suffisante seront susceptibles de ballonner et de rompre. Les conséquences radiologiques des accidents concernés sont donc actuellement évaluées avec un certain conservatisme. L'évaluation de ce conservatisme pourrait permettre à EDF de réviser à la baisse les estimations de conséquences radiologiques des accidents concernés.

Toutefois, l'évolution souhaitée par EDF pourrait conduire, en cas de modification des conditions d'exploitation des réacteurs, à une augmentation des conséquences radiologiques. En effet, dans le référentiel actuel, le nombre de crayons susceptibles de rompre en transitoire est inférieur aux limites de 5 % et 10 % compte tenu de l'existence de crayons passant en crise d'ébullition, mais qui ne peuvent pas ballonner. **L'évolution souhaitée par EDF lui permettrait d'augmenter le nombre de crayons susceptibles de rompre pendant un transitoire accidentel jusqu'à la limite (5 ou 10 %), entraînant ainsi une augmentation des conséquences radiologiques par rapport à la situation actuelle. Les critères de 5 % (catégorie 3) et 10 % (catégorie 4) des crayons en crise d'ébullition contribuant à la fois à limiter l'endommagement du combustible et les conséquences radiologiques des accidents concernés, l'IRSN estime que leur vérification doit être maintenue, ce qui fait l'objet de la recommandation n°3 en annexe.** À cet égard, l'IRSN souligne que ces limites ont toujours été vérifiées par EDF pour les REP actuellement en fonctionnement et ce quelle que soit la gestion de combustible mise en œuvre.

Enfin, en cas de rupture de gaines par ballonnement à la suite de la crise d'ébullition, les diverses conséquences d'une éventuelle dispersion de fragments de pastilles dans le circuit primaire ne sont pas étudiées. Cette dispersion doit donc être exclue, ce qu'EDF a démontré dans le cadre de cette instruction pour les gestions de combustible en

vigueur. L'absence de risque de dispersion ayant toutefois été démontrée avec peu de marge, EDF s'est engagé à mettre à jour cette démonstration lors des reprises des études d'accidents qui seront effectuées à l'occasion des visites décennales ou d'autres modifications le nécessitant. De plus, EDF s'est engagé à désormais mentionner explicitement dans les rapports de sûreté l'exigence d'absence de dispersion de combustible à la suite de la rupture de crayons résultant de leur ballonnement consécutif à la crise d'ébullition pour les transitoires de catégories 3 et 4.

Critères relatifs à la fusion du combustible

Dans le cas extrême d'une augmentation excessive des températures de la gaine et des pastilles de combustible consécutive à une importante insertion de réactivité ou à une entrée en crise d'ébullition qui dégrade fortement le refroidissement, le crayon de combustible peut fondre, au moins partiellement.

Dans le référentiel de sûreté actuel, des critères techniques d'acceptation visent à s'assurer de l'absence de fusion du combustible pour les conditions de fonctionnement de catégories 1 et 2 et à limiter à 10 % la fraction volumique de combustible fondu au centre de la pastille pour le crayon le plus « chaud » du cœur en transitoire de catégorie 4. Le respect de ce critère garantit que la fusion du combustible reste limitée et localisée au centre de la pastille et, in fine, que le refroidissement du cœur est assuré. De plus, toute fusion en périphérie de la pastille (à proximité de la gaine) doit être exclue. À cet égard, EDF s'est engagé à désormais vérifier dans les études de sûreté, avec une modélisation homogène de la thermique de la pastille, que la température en périphérie de la pastille reste inférieure à la température de fusion.

Le référentiel de sûreté actuel ne comporte pas d'exigence relative au risque de fusion du combustible pour les accidents de catégorie 3. EDF prévoit dorénavant de vérifier la limite de 10 % de combustible fondu au centre de la pastille dans le transitoire de catégorie 3 concerné par ce risque (à savoir le retrait incontrôlé d'une grappe de commande initié en puissance). L'IRSN estime cette évolution acceptable pour le parc en fonctionnement. EDF s'est engagé à mettre en cohérence les évaluations des conséquences radiologiques de l'accident concerné.

Pour ce qui concerne les nouveaux réacteurs, les systèmes mis en œuvre (EPR Flamanville 3) permettent d'éviter la fusion du combustible en cas de retrait incontrôlé d'une grappe en puissance et de limiter ainsi significativement les conséquences radiologiques associées.

Impact des déformations latérales des assemblages de combustible

Les assemblages de combustible se déforment latéralement pendant leur irradiation en réacteur sous l'effet des efforts hydrauliques exercés par l'eau circulant dans le cœur du réacteur, des efforts mécaniques appliqués par l'embout supérieur¹⁵ pour les maintenir en position, de l'irradiation et de la température. La conception des assemblages, notamment l'épaisseur et le matériau des tubes-guides, ainsi que leur position dans le cœur¹⁶ pendant leur irradiation et la durée de leur irradiation jouent également un rôle dans l'amplitude des déformations. Ces déformations ne sont pas mesurables lorsque la cuve du réacteur est fermée, mais elles sont observables indirectement grâce à des mesures réalisées sur les assemblages après leur déchargement dans la piscine d'entreposage. En effet, les assemblages restent déformés même après avoir été déchargés du cœur.

¹⁵ L'embout supérieur de l'assemblage de combustible est une pièce massive munie de ressorts qui permet l'application d'efforts de compression qui s'opposent aux forces hydrauliques ascendantes.

¹⁶ Un assemblage de combustible placé au centre du cœur se déforme plus qu'un assemblage de combustible placé à la périphérie du cœur. Un assemblage muni d'une grappe « bouchon » se déforme plus qu'un assemblage muni d'une grappe de commande.

Les déformations latérales mesurées sont de l'ordre de quelques millimètres et peuvent aller jusqu'à 20 mm dans certaines situations extrêmes, par rapport à une situation nominale caractérisée par des assemblages rectilignes et des jeux latéraux entre les plaquettes externes des grilles des assemblages voisins de l'ordre de 2 mm. Lorsque les déformations sont importantes, elles ralentissent la chute des grappes de commande, voire empêchent leur insertion complète, alors que le temps de chute des grappes et leur insertion complète sont des hypothèses importantes des études de sûreté.

À l'aide des mesures disponibles et d'un modèle, EDF a pu estimer les déformations des assemblages en réacteur et donc en déduire les lames d'eau, ou jeux inter-assemblages, en réacteur. Cette estimation des lames d'eau, quoique reposant sur un modèle appuyé sur peu d'éléments de validation, est assez robuste aux principaux choix de modélisation et aux valeurs retenues pour les paramètres du modèle. De plus, EDF s'est engagé à fournir une note de validation du modèle utilisé. L'IRSN estime que la démarche ainsi mise en œuvre par EDF est satisfaisante et conforme à l'état des connaissances sur le sujet. Selon les estimations réalisées, les tailles de lames d'eau dans les cœurs des réacteurs de 1300 MWe seraient comprises entre 0 mm (situation de contact, assez fréquemment rencontrée) et 5 mm dans 95 % des cas. Un petit nombre de grandes lames d'eau (10 voire 15 mm) existeraient dans certains cœurs à certains endroits.

Les essais de temps de chute des grappes de commande prévus par les règles générales d'exploitation des REP d'EDF permettent de vérifier le respect des critères associés, qui peuvent, en cas de déformation trop importante des assemblages, être mis en cause. En plus de cet effet potentiel, les déformations latérales des assemblages ont d'autres conséquences pour la sûreté, de natures neutronique, thermohydraulique et mécanique :

- la présence de lames d'eau élargies conduit à l'accroissement de la puissance des crayons périphériques des assemblages, au droit de ces lames d'eau, par rapport au cas nominal considéré. EDF a développé et mis en œuvre sur un cas d'application une méthode de quantification et de prise en compte de cet effet dans la démonstration de sûreté. L'IRSN estime cette méthode satisfaisante. EDF s'est engagé à la décliner lors des réexamens de sûreté à venir et, dans l'attente, à l'utiliser dans les calculs d'évaluation de la sûreté des recharges¹⁷ des cœurs ;
- la présence de lames d'eau élargies conduit, comme indiqué ci-dessus, à l'accroissement de la puissance des crayons périphériques, ce qui diminue le rapport de flux thermique critique, mais également à un accroissement du diamètre hydraulique du canal correspondant, ce qui l'augmente. Compte tenu de ces effets antagonistes, le canal du fluide réfrigérant dans lequel le rapport de flux thermique critique minimum est atteint, qui est supposé être un canal situé à l'intérieur de l'assemblage dans les études actuelles, pourrait devenir un canal périphérique. Or, dans ces canaux, les plaquettes de grilles ne disposent pas d'ailettes de mélange, ce qui réduit significativement le flux critique. Pour évaluer cet effet, EDF s'est appuyé sur des corrélations de flux critique établies en présence d'ailettes de mélange. EDF s'est engagé à fournir de nouveaux éléments pour compléter son approche actuelle que l'IRSN estime insuffisante. Compte tenu de l'ampleur des éléments restant à apporter, l'IRSN ne peut pas, à ce stade, se prononcer sur le risque que le rapport de flux thermique critique minimum soit atteint en périphérie d'assemblage et sur les conséquences qu'aurait la mise en cause de l'hypothèse actuellement retenue dans les études de sûreté. La présence de lames d'eau élargies conduit également à augmenter le facteur d'élévation d'enthalpie¹⁸ du

¹⁷ EDF réalise, en préalable à chaque rechargement de combustible, une analyse qui a pour objet de vérifier le respect d'un certain nombre de valeurs limites associées à des paramètres neutroniques, s'assurant ainsi de la sûreté du nouveau cœur.

¹⁸ Le facteur d'élévation d'enthalpie est défini comme le rapport entre l'élévation d'enthalpie maximale, rencontrée dans le canal chaud du cœur, et l'élévation moyenne d'enthalpie du cœur.

canal chaud du cœur. EDF s'est engagé à définir et à mettre en œuvre une démarche visant à évaluer cet impact ;

- la présence de lames d'eau réduites, et notamment l'existence de situations de contact entre les grilles, accroît vraisemblablement les efforts maximaux d'impact sur les grilles des assemblages de combustible en cas de séisme ou d'APRP. À ce stade, EDF n'a pas évalué l'effet de jeux inter-assemblages variables, représentatifs de la situation rencontrée en réacteur, sur le risque de flambage¹⁹ des grilles des assemblages.

À cet égard, il convient de rappeler que l'absence de flambage des grilles est un critère de découplage dont le respect contribue à garantir la chute des grappes en situation accidentelle et la capacité de refroidissement du cœur. Par ailleurs, la validation du modèle utilisé par EDF pour calculer les efforts d'impact sur les grilles en situation accidentelle n'est pas suffisante, en particulier dans la mesure où elle ne comporte pas de comparaison avec des résultats d'essais représentatifs. EDF s'est engagé à rédiger une note de validation de ce modèle, basée sur des essais de lâcher latéral d'assemblage et des essais multi-assemblages en situation de séisme. Enfin, une anomalie sur un paramètre influent du modèle, la raideur interne des grilles, a été mise en évidence pendant l'instruction. EDF a prévu de corriger la valeur de ce paramètre, qui est actuellement sous-évaluée.

En conclusion, l'IRSN estime qu'EDF doit quantifier l'effet des déformations d'assemblage sur les forces d'impact sur les grilles en situation accidentelle. Ce point est précisé dans la recommandation n°4 en annexe.

Impact de la présence de crayons inétanches

La démonstration de sûreté actuelle repose sur l'hypothèse que les crayons de combustible soumis à un transitoire incidentel ou accidentel sont des crayons initialement sans défaut d'étanchéité ou fragilité particulière. Cependant, des crayons ne vérifiant pas ces conditions sont présents dans les réacteurs d'EDF. Il s'agit de crayons ayant perdu leur étanchéité à la suite par exemple d'une usure de la gaine due à la vibration d'un corps migrant coincé dans une cellule de grille.

Une demande spécifique relative à l'évaluation des conséquences d'un accident d'éjection de grappe en présence de crayons inétanches a été formulée par l'ASN à l'issue des réunions du Groupe permanent d'experts pour les réacteurs nucléaires consacrées à l'examen du « retour d'expérience sur le combustible » [5] en 2004 et à l'examen de la gestion de combustible GALICE en 2008 [6]. Puis, dans le cadre de la présente instruction, l'ASN a élargi aux autres transitoires de catégories 2 à 4 la demande de prise en compte de la présence de crayons inétanches dans la démonstration de sûreté.

Les taux de défaillance, c'est-à-dire de perte d'étanchéité, des crayons de combustible dans les réacteurs d'EDF sont maîtrisés. En particulier, les défauts de conception ou de fabrication des crayons n'engendrent aujourd'hui que très peu de défaillances en fonctionnement. La présence de corps migrants dans le circuit primaire continue à engendrer quelques défaillances. Actuellement, sept réacteurs d'EDF sur les 58 en fonctionnement présentent un ou quelques crayons en présomption de défaut.

¹⁹ Le flambage est un phénomène d'instabilité d'une structure qui, soumise à un effort normal de compression, a tendance à fléchir et se déformer.

La présence d'un défaut dit « primaire » (perte d'étanchéité initiale) entraîne l'entrée d'eau dans le crayon, ce qui conduit fréquemment, par un mécanisme physico-chimique assez bien expliqué et lié à l'oxydation de la gaine sur sa face interne par la vapeur d'eau, à l'apparition d'un défaut dit « secondaire » fragilisant fortement la gaine dans une zone située à plusieurs mètres du défaut initial, au point qu'une rupture suivie de la dissémination de matière fissile dans le circuit primaire peut se produire, même en fonctionnement normal.

Outre les effets directs en termes de contamination du circuit primaire pris en compte par les spécifications radiochimiques des règles générales d'exploitation, la présence d'un ou plusieurs crayons avec défauts a des conséquences en cas de transitoire incidentel ou accidentel.

Tout d'abord, l'accident d'éjection de grappe (classé en catégorie 4) conduirait à une rupture brutale des crayons initialement inétanches situés à proximité de la grappe éjectée, à l'éjection de fragments de pastilles de combustible solide dans le réfrigérant et à une interaction thermique violente entre les fragments de pastilles de combustible et le réfrigérant. Cette interaction générerait une onde de pression et conduirait à l'apparition d'une zone de vapeur qui pourrait assécher les crayons voisins, et donc conduire à leur endommagement. De plus, les ondes de pression générées par l'interaction se propageraient vers les crayons voisins et vers la cuve et pourraient les endommager. Suite à une demande de l'ASN, qui résultait de l'instruction par l'IRSN de la première étude d'EDF sur ce sujet, EDF a procédé à des évolutions importantes de sa méthode d'étude de ce scénario. **L'IRSN estime que la démonstration d'EDF prend désormais en compte de manière globalement satisfaisante l'état des connaissances concernant les phénomènes menant au pic de pression. Toutefois, la démonstration d'EDF a beaucoup évolué pendant l'instruction et reste à consolider sur plusieurs points. EDF s'est engagé à réaliser les consolidations nécessaires. De plus, l'IRSN émet des réserves, faisant l'objet de la recommandation n°5 en annexe, sur certains choix de modélisation. Toutefois, compte tenu des éléments fournis par EDF, l'IRSN estime, sous réserve des conclusions de la prise en compte de la recommandation n°5 et du résultat des actions de consolidation de l'évaluation de l'interaction thermique prévues par EDF, que l'onde de pression ne devrait pas être de nature à mettre en cause la tenue des crayons voisins ou de la cuve. De même, la formation d'une zone de vapeur, si elle peut endommager les crayons voisins, ne devrait pas conduire à une nouvelle dispersion de combustible consécutive à cet endommagement, ce qui limitera in fine les conséquences de l'interaction. Par ailleurs, l'impact de la présence initiale de quelques crayons inétanches sur les estimations des conséquences radiologiques de l'accident d'éjection de grappe est faible.**

Pour ce qui concerne les autres conditions de fonctionnement de référence de catégories 2 à 4, l'IRSN estime vraisemblable que, dans beaucoup de cas, les sollicitations résultant du transitoire entraîneraient la rupture des crayons inétanches dans la zone du défaut secondaire et la dispersion de fragments de pastilles de combustible dans le circuit primaire. Ces phénomènes ne sont cependant pas susceptibles de mettre en cause la capacité de refroidissement du cœur et d'avoir un impact significatif sur les estimations des conséquences radiologiques des transitoires concernés, sauf pour l'accident de rupture de tube de générateur de vapeur (RTGV). En effet, l'accident de RTGV se caractérise par une brèche de la deuxième barrière, un bipasse de l'enceinte et la possibilité de rejets liquides dans l'environnement en cas de débordement des générateurs de vapeur. EDF s'est engagé à étudier les conséquences de ce scénario.

Conclusion

Les éléments transmis par EDF ont permis de procéder à une revue complète des exigences et des critères techniques d'acceptation relatifs au comportement de la première barrière de confinement, et plus généralement du combustible. Ces critères, qui existent pour la plupart depuis la conception des REP, ont été significativement complétés à l'occasion de cet examen.

L'analyse de l'adéquation entre les phénomènes physiques mis en jeu et les exigences associées pour les conditions de fonctionnement de catégories 1 à 4 ainsi que l'analyse de l'exhaustivité et de la pertinence des critères et des évolutions prévues par EDF ont permis, sous réserve de la prise en compte des recommandations n°1 et 2 en annexe, de conforter certaines valeurs limites, de les compléter et d'en introduire de nouvelles. Toutefois, l'IRSN estime que l'évolution souhaitée par EDF concernant le remplacement du critère technique d'acceptation portant sur le nombre de crayons entrant en crise d'ébullition par un critère portant sur le nombre de crayons ballonnés rompus ne peut pas être retenue, comme indiqué dans la recommandation n°3.

Par ailleurs, la prise en compte dans la démonstration de sûreté de l'état réel des combustibles dans les réacteurs en exploitation a donné lieu à un travail important de la part d'EDF portant sur la déformation latérale des assemblages de combustible et sur les conséquences de la présence de crayons inétanches, qui appelle néanmoins des compléments faisant l'objet, soit d'engagements pris par EDF, soit des recommandations n°4 et 5 émises en annexe.

Enfin, compte tenu des engagements pris par EDF, les phénomènes physiques étudiés dans les études d'accidents présentées dans les rapports de sûreté seront cohérents avec les hypothèses des études associées de conséquences radiologiques.

Au final, compte tenu des engagements pris par EDF durant l'instruction, l'IRSN estime que le réexamen des critères de tenue du combustible réalisé par EDF est satisfaisant sous réserve de la prise en compte des recommandations jointes en annexe au présent avis.

Pour le directeur général et par délégation,

Frédérique PICHEREAU

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté

Annexe à l'Avis IRSN/2017-00168 du 22 mai 2017

Recommandations

Recommandation n° 1 :

Pour garantir l'absence de rupture de gaine par interaction mécanique entre la pastille et la gaine des crayons de combustible UO_2 à gainage ZIRLO et Optimized ZIRLO pendant un transitoire d'éjection de grappe, l'IRSN recommande que le critère technique d'acceptation à retenir, exprimé en variation d'enthalpie du combustible, tienne compte des incertitudes expérimentales sur l'énergie injectée au cours de l'essai retenu pour le déterminer et sur l'épaisseur d'oxyde externe du gainage du crayon ayant fait l'objet de l'essai.

Recommandation n° 2 :

L'IRSN recommande qu'EDF justifie la qualité statistique de la corrélation définie pour le gainage Zircaloy-4 qui permet d'évaluer la teneur en hydrogène en fonction de l'épaisseur d'oxyde de la gaine mesurée. EDF devra réviser, le cas échéant, les valeurs maximales de teneur en hydrogène associées aux critères de tenue mécanique des crayons de combustible à gainage M5, ZIRLO et Optimized ZIRLO relatifs au risque d'interaction mécanique entre la pastille et la gaine, ces critères ayant été établis à partir d'essais sur des échantillons de gaine en Zircaloy-4.

Recommandation n° 3 :

L'IRSN recommande qu'EDF maintienne les limites exprimées en nombre de crayons susceptibles d'entrer en crise d'ébullition de respectivement 5 % et 10 % pour les conditions de fonctionnement de référence de catégories 3 et 4.

Recommandation n° 4 :

L'IRSN recommande qu'EDF quantifie les conséquences des déformations latérales des assemblages de combustible en cœur sur les forces d'impact sur les grilles d'assemblage en situation accidentelle, en utilisant un modèle de rangée d'assemblages préalablement validé et les distributions de tailles de lames d'eau en cœur qu'il a calculées. La démonstration de sûreté sera mise à jour en conséquence.

Recommandation n° 5 :

L'IRSN recommande que, pour l'étude des conséquences de la dispersion de combustible chaud dans le réfrigérant à la suite d'une éjection de grappe en présence de crayons initialement inétanches, EDF justifie que les modélisations qu'il a retenues concernant l'énergie transmise au fluide sous la forme d'une puissance massique et les transferts thermiques entre le liquide et la vapeur sont adaptées à l'évaluation de l'interaction thermique et de ses conséquences.