

**GROUPE PERMANENT D'EXPERTS
POUR LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES**

**AVIS ET RECOMMANDATIONS RELATIF
AUX CRITÈRES DE TENUE DU COMBUSTIBLE
DES RÉACTEURS À EAU SOUS PRESSION**

Réunion tenue à Montrouge le 15 juin 2017

I

Conformément à la saisine de l'Autorité de sûreté nucléaire, notifiée par la lettre CODEP-DCN-2014-001304 du 28 janvier 2014, le groupe permanent d'experts pour les réacteurs nucléaires s'est réuni le 15 juin 2017 pour examiner les critères de tenue du combustible des réacteurs à eau sous pression exploités par EDF.

Au cours de cette réunion, les participants ont pris connaissance de l'analyse réalisée par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur la base du dossier transmis par EDF et des éléments complémentaires qu'il a recueillis au cours de l'instruction.

Dans le cadre de cette instruction, EDF a pris différents engagements, qu'il devra confirmer à l'Autorité de sûreté nucléaire. Le groupe permanent a par ailleurs entendu les commentaires présentés en séance par EDF.

II

Le groupe permanent a examiné la pertinence des évolutions prévues par EDF pour ce qui concerne les critères liés aux risques d'endommagement des combustibles comportant des gaines en alliage ZIRLO, ZIRLO optimisé et M5, actuellement utilisés dans les réacteurs à eau sous pression d'EDF, et ce pour toutes les conditions de fonctionnement de référence sollicitant le combustible, à l'exception de l'accident de perte de réfrigérant primaire dont le référentiel d'étude a fait l'objet d'un examen en 2010 et en 2014, qui a conduit aux avis du groupe permanent référencés CODEP-MEA-2010-028862 et CODEP-MEA-2014-018590. L'examen n'a pas porté sur les combustibles comportant des gaines en alliage Zircaloy-4, dans la mesure où de tels combustibles ne sont plus chargés à l'état neuf dans les réacteurs d'EDF depuis la fin de l'année 2016. Le groupe permanent s'est également intéressé à la cohérence entre les critères de tenue du combustible vérifiés dans les études des conditions de fonctionnement de référence et les hypothèses d'évaluation des conséquences radiologiques de ces conditions de fonctionnement.

Les risques d'endommagement des combustibles sont associés aux phénomènes physiques redoutés suivants :

- la corrosion des gaines des crayons de combustible ;
- l'interaction entre les pastilles et la gaine des crayons de combustible ;
- le passage en crise d'ébullition des crayons de combustible et ses conséquences ;
- la fusion des pastilles de combustible.

Pour tenir compte de l'état des combustibles présents dans les réacteurs d'EDF, le groupe permanent a de plus considéré les conséquences sur la sûreté des déformations latérales des assemblages de combustible et de la présence possible de crayons inéanches.

III

Critères relatifs à la corrosion des gaines

Le groupe permanent estime acceptable qu'EDF ne vérifie plus systématiquement le critère d'épaisseur limite de la couche externe de zircône qui se développe au cours de l'irradiation en fonctionnement normal, compte tenu des performances des nouveaux types de gainage sur lesquels l'examen a porté. De même, le groupe permanent estime qu'EDF a correctement démontré, pour ces gainages, l'absence de risque de corrosion accélérée en cas de transitoire de catégorie 2. Pour les conditions de fonctionnement des catégories 3 et 4, au cours desquelles les températures atteintes par les gaines peuvent être très élevées (plus de 900 °C) et entraîner alors leur fragilisation rapide, le critère actuel de température maximale de gaine, fixé à 1482 °C, ne permet pas d'assurer la capacité de refroidissement du cœur du réacteur si l'excursion de température dure trop longtemps. EDF a proposé de compléter ce critère par une limite en taux d'oxydation en fonction de la température maximale des gaines. Le groupe permanent estime que, sur le principe, le nouveau critère est acceptable. Toutefois EDF devra, comme il s'y est engagé, compléter sa démarche en tenant compte de manière exhaustive des phénomènes physiques fragilisant les gaines dans les conditions de fonctionnement correspondantes et des incertitudes affectant les résultats des essais utilisés pour définir le nouveau critère.

Interaction entre les pastilles et la gaine

Dans les conditions de fonctionnement conduisant à une augmentation de puissance, la dilatation thermique des pastilles de combustible entraîne une sollicitation de la gaine pouvant mettre en cause sa tenue par interaction entre les pastilles et la gaine (IPG). La sollicitation peut être purement mécanique ou assistée par la corrosion due à certains produits de fission présents dans les crayons de combustible irradiés.

Pour l'IPG assistée par la corrosion sous contrainte, EDF a présenté, pour le cas du retrait incontrôlé d'une grappe de commande en puissance, classé en catégorie 3 des conditions de fonctionnement, une démonstration d'absence de rupture de gaine consécutive à ce mode de sollicitation. Le groupe permanent estime que cette démonstration, qui n'était faite jusqu'à présent que pour les transitoires de catégorie 2, permet de confirmer le caractère conservatif de l'évaluation des conséquences radiologiques de cette condition de fonctionnement. Pour les autres conditions de fonctionnement des catégories 3 et 4 concernées, EDF a transmis un argumentaire pour démontrer l'absence de rupture de gaine par IPG assistée par la corrosion sous contrainte, argumentaire s'appliquant à la gestion de combustible Parité MOX. Le groupe permanent estime que cet argumentaire est acceptable ; il devra toutefois être conforté et étendu aux autres gestions de combustible.

Dans les conditions de fonctionnement de catégorie 2, l'intégrité de la gaine, dont le respect doit être assuré, peut être mise en cause par l'interaction mécanique entre les pastilles et la gaine. Pour le cas du retrait incontrôlé de groupes de grappes de commande initié à puissance nulle, pour lequel ce risque n'était pas étudié jusqu'à présent, EDF a retenu un critère en déformation plastique maximale de la

gaine fixé à 1 %. De plus, pour les conditions de fonctionnement de catégorie 2 entraînant des rampes de puissance, EDF a porté de 1 à 2 % la limite à vérifier en déformation maximale de gaine, pour les gaines dont les teneurs en hydrogène sont inférieures à 250 ppm. EDF ayant interprété de manière prudente les résultats des essais permettant de justifier ces évolutions, le groupe permanent les estime acceptables.

En ce qui concerne l'éjection de grappe, condition de fonctionnement de catégorie 4, l'interaction mécanique entre pastilles et gaines peut entraîner la rupture de gaines, l'expulsion de fragments de combustible chauds dans le réfrigérant primaire et une interaction thermodynamique violente, pouvant mettre en cause le refroidissement du cœur. Le critère actuel, limitant l'enthalpie maximale du combustible à 200 cal/g, garantit l'absence de dispersion de fragments de combustible pour des taux de combustion des assemblages inférieurs à 33 GWj/tU. Pour les combustibles plus irradiés, EDF a complété et révisé la démonstration par des critères exprimés en variation d'enthalpie du combustible, dépendant de la conception des crayons, et garantissant l'absence de rupture de gaine et donc, *de facto*, l'absence de dispersion. Le groupe permanent estime que le critère concernant le combustible UO₂ à gainage M5, fondé sur l'interprétation d'essais d'éjection de grappe, est acceptable. Le groupe permanent note qu'EDF s'est engagé à mettre en œuvre une démarche similaire pour définir un critère relatif au combustible MOX à gainage M5. Enfin, pour le combustible UO₂ à gainage ZIRLO ou ZIRLO optimisé, le groupe permanent estime la démarche retenue par EDF acceptable dans son principe, mais note que la valeur limite retenue ne tient pas compte des incertitudes expérimentales. Cela conduit le groupe permanent à retenir la recommandation n°1 de l'annexe au présent avis.

De plus, outre l'effet direct de l'oxydation des gaines pendant leur irradiation qui réduit l'épaisseur de métal, cette oxydation entraîne une augmentation de la teneur en hydrogène dans les gaines, qui les fragilise. Les critères proposés par EDF ayant été élaborés à partir de résultats d'essais essentiellement réalisés sur des échantillons de gaines en alliage Zircaloy-4, dont la teneur en hydrogène a été estimée à partir de l'épaisseur mesurée de la couche de zircone, le groupe permanent retient la recommandation n°2 de l'annexe au présent avis.

Crise d'ébullition et risque de dispersion de fragments de pastilles associé

Lors de certaines conditions de fonctionnement, le flux thermique à la paroi des gaines peut dépasser une valeur, dite « critique », entraînant une crise d'ébullition et une augmentation importante de la température des gaines concernées puis, en fonction de la pression dans les crayons due aux gaz de fission, leur ballonnement et leur rupture. EDF propose de remplacer les critères techniques d'acceptation des études portant sur le nombre de crayons entrant en crise d'ébullition (limité à 5 % pour les conditions de fonctionnement de catégorie 3 et à 10 % pour celles de catégorie 4) par des critères portant sur le nombre de crayons susceptibles d'être ballonnés et rompus, tout en gardant les mêmes valeurs limites, sachant que, parmi les crayons subissant une crise d'ébullition, seuls ceux qui ont une pression suffisante sont susceptibles de ballonner et rompre. Le groupe permanent note que les conséquences radiologiques des conditions de fonctionnement concernées ont été jusqu'à présent estimées en supposant que tous les crayons subissant une crise d'ébullition perdent leur intégrité, ce qui constitue une approche conservative. Après une discussion qui n'a pas conduit à une position

unanime, le groupe permanent a estimé à la majorité que faire porter le critère sur le nombre de crayons susceptibles de rompre et non plus sur le nombre de crayons soumis à crise d'ébullition, constituait une approche recevable, car plus conforme à la physique. Il souligne toutefois que l'adoption des nouveaux critères ne devrait pas aller à l'encontre de l'objectif de réduire autant que raisonnablement possible le nombre de crayons rompus et les conséquences radiologiques des accidents. Il souligne également que, dans les futures démonstrations de sûreté, l'estimation du nombre de crayons non susceptibles de rompre parmi ceux qui auront été soumis à crise d'ébullition devra être rigoureusement étayée.

Le groupe permanent estime par ailleurs qu'EDF a correctement démontré l'absence de risque de dispersion de fragments de pastilles de combustible dans le circuit primaire en cas de rupture de gaine par ballonnement résultant d'une crise d'ébullition. EDF s'est engagé à intégrer désormais cette démonstration dans les rapports de sûreté de ses réacteurs.

Fusion du combustible

Pour certaines conditions de fonctionnement de catégories 3 et 4, l'échauffement du combustible peut conduire à la fusion de pastilles. Cependant, pour les réacteurs d'EDF du parc en fonctionnement, le risque correspondant n'était jusqu'à présent pas étudié pour les conditions de fonctionnement de catégorie 3. Comme c'est déjà le cas pour les conditions de fonctionnement de catégorie 4, EDF a désormais prévu de vérifier que, pour les conditions de catégorie 3, la fraction de combustible fondu au centre de la pastille au point le plus chaud du cœur reste inférieure à 10 %, ce qui permet d'éviter les risques d'interaction thermique violente entre du combustible fondu et le réfrigérant primaire, et ainsi de maintenir le refroidissement du cœur. EDF s'est de plus engagé à mettre en cohérence les évaluations des conséquences radiologiques des conditions de fonctionnement de catégorie 3 concernées présentées dans ses rapports de sûreté.

Par ailleurs, EDF s'est engagé à vérifier désormais explicitement dans les études des conditions de fonctionnement concernées que les températures à la périphérie des pastilles restent inférieures à la température de fusion du combustible.

Le groupe permanent estime que ces évolutions sont pertinentes.

Déformations latérales des assemblages de combustible

Des déformations latérales d'assemblages de combustible en fonctionnement normal sont observées indirectement lors de leur déchargement. Ces déformations peuvent ralentir, voire empêcher l'insertion complète des grappes de commande en cas d'arrêt automatique du réacteur, phénomènes que les essais de temps de chute des grappes permettent de détecter en cours de fonctionnement. En revanche, d'autres conséquences neutroniques, thermohydrauliques ou mécaniques de ces déformations ne sont pas étudiées dans les démonstrations de sûreté transmises jusqu'à présent. A ce sujet, EDF a développé une modélisation des déformations, permettant d'estimer les tailles des lames d'eau entre les grilles des assemblages dans les cœurs. Le groupe permanent estime que le modèle développé par EDF est conforme à l'état des connaissances. Puis, en ce qui concerne les conséquences de ces déformations pour la sûreté :

- EDF a développé une méthode de quantification et de prise en compte de l'effet neutronique des déformations sur la distribution de puissance dans le cœur, que le groupe permanent estime adaptée ;
- EDF a développé une première approche d'évaluation des conséquences thermohydrauliques, notamment en termes de réduction potentielle du rapport de flux thermique critique, qu'il s'est engagé à compléter et à justifier. Le groupe permanent souligne l'ampleur des éléments et justifications qu'EDF doit encore apporter, une première application de cette approche étant attendue à l'occasion des quatrièmes visites décennales des réacteurs de 900 MWe ;
- EDF a réalisé des premières études de sensibilité concernant l'effet des jeux entre les assemblages de combustible sur les efforts subis par les grilles en cas de séisme, sur la base d'un modèle que le groupe permanent estime insuffisamment validé, alors même qu'aucun coefficient de sécurité sur la limite de flambage des grilles n'est retenu. EDF s'est engagé à transmettre une note de validation tenant compte de résultats d'essais représentatifs. Le groupe permanent souligne de plus que les études transmises ne tiennent pas compte de la variabilité estimée des jeux entre les assemblages de combustible. Cela conduit le groupe permanent à retenir la recommandation n°3 de l'annexe au présent avis.

Présence de crayons inétanches pendant le fonctionnement

Malgré les dispositions prises pour éviter les défaillances de gaines des crayons de combustible en fonctionnement normal, les réacteurs d'EDF peuvent connaître de telles défaillances en cours de cycle et continuer à fonctionner jusqu'à la fin du cycle avec un ou quelques crayons inétanches, dès lors que les spécifications radiochimiques du fluide primaire sont respectées. En plus de la contamination du circuit primaire qu'elles induisent, les pertes d'étanchéité de crayons pourraient avoir d'autres conséquences dans certaines conditions de fonctionnement de référence. En particulier, en cas d'éjection d'une grappe de commande, une rupture brutale de crayons inétanches situés à proximité de la grappe éjectée conduirait à une dispersion de fragments de pastilles de combustible chauds dans le fluide primaire, entraînant une interaction thermique violente. Sur ce sujet, EDF a transmis une étude, appuyée sur des résultats d'essais et des simulations numériques, visant à démontrer la capacité de refroidissement du cœur et la tenue de la cuve du réacteur dans ces conditions. Le groupe permanent estime que cette étude, globalement conforme à l'état des connaissances sur les phénomènes qui pourraient intervenir dans cette situation et présentant, pour ce qui concerne l'étude de la tenue de la cuve, des conservatismes importants, repose toutefois sur des choix de modélisation relatifs à l'interaction thermique entre le combustible éjecté et le fluide qui n'ont pas été justifiés. Cela conduit le groupe permanent à retenir la recommandation n°4 de l'annexe au présent avis.

Par ailleurs, le retour d'expérience montre que la présence d'un défaut initial, dit « primaire », dans une gaine d'un crayon de combustible, entraîne au bout d'un certain temps l'apparition d'un défaut secondaire sous l'effet oxydant de la vapeur d'eau qui a pénétré à l'intérieur du crayon. Le défaut secondaire correspond à l'apparition d'une zone très fragile de la gaine, qui peut être à l'origine d'une rupture suivie de la dissémination de matière fissile dans le circuit primaire, même en fonctionnement normal. Sur la base des éléments transmis par EDF, le groupe permanent estime cependant que la

rupture de cette zone en transitoire incidentel ou accidentel, et la dispersion de fragments de pastilles de combustible dans le réfrigérant qui en résulterait, ne sont pas de nature à entraîner des dommages importants dans le cœur du réacteur, ni à augmenter significativement les conséquences radiologiques pour les conditions de fonctionnement concernées, à l'exception de l'accident de rupture de tubes de générateurs de vapeur, pour lequel EDF s'est engagé à transmettre une étude complémentaire.

IV

Le groupe permanent souligne l'importance et le caractère approfondi du travail réalisé par EDF au cours des dernières années, qui a permis de procéder à une revue exhaustive des phénomènes pouvant affecter les crayons et les assemblages de combustible dans les diverses conditions de fonctionnement de référence, puis de réviser et de compléter en tant que de besoin les critères techniques d'acceptation relatifs à la tenue du combustible dans ces conditions, dont la plupart dataient des années 1970. EDF a également réalisé des études en vue de tenir compte, dans les démonstrations de sûreté, de l'état prévisible des assemblages de combustible présents dans ses réacteurs.

Le groupe permanent estime que l'ensemble de ce travail constitue une avancée notable dans l'approche des questions de sûreté relatives à la tenue du combustible. Il devra toutefois être encore complété, sur certains points significativement, par les actions auxquelles EDF s'est engagé et par la mise en œuvre des recommandations jointes au présent avis.

ANNEXE

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 ZIRLO optimisé pendant un transitoire d'éjection de grappe, le groupe permanent 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 des essais retenus pour le déterminer et sur l'épaisseur d'oxyde externe du gainage du crayon ayant fait l'objet de ces essais.

Recommandation n°2 :

Le groupe permanent 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 ZIRLO optimisé relatifs au risque d'interaction mécanique entre la pastille et la gaine lorsque ces critères ont été établis à partir d'essais sur des échantillons de gaine en Zircaloy-4.

Recommandation n°3 :

Le groupe permanent 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 rangées d'assemblages préalablement validé et les distributions de tailles de lames d'eau en cœur qu'il a calculées.

Recommandation n°4 :

Le groupe permanent 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 inétanches, EDF apporte les éléments montrant 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 permettent d'apprécier de façon pertinente les conséquences de l'interaction thermique.