

DIRECTION DES CENTRALES NUCLEAIRES

Montrouge, le 27 mai 2019 5 juin 2019

Réf. : CODEP-DCN-2019-010454

Monsieur le Directeur
Division Production Nucléaire
EDF
Site Cap Ampère – 1 place Pleyel
93 282 SAINT-DENIS CEDEX

Objet : Réacteurs électronucléaires - EDF
GP – Critères de tenue du combustible des réacteurs à eau sous pression

Réf. : voir annexe 1

Monsieur le Directeur,

Les critères techniques d'acceptation liés à la tenue du combustible ont été définis au moment du démarrage du programme nucléaire français, sur la base des connaissances de l'époque. Il s'agit pour la plupart de critères issus du référentiel américain. Une partie de ces critères a fait l'objet d'une instruction par l'ASN dans le cadre de l'examen de nouvelles gestions de combustible, du réexamen de méthodes d'étude d'accident ou de dossiers spécifiques.

L'ASN et l'IRSN ont considéré qu'il était nécessaire de consolider les connaissances sur les critères techniques d'acceptation du combustible, notamment pour prendre en compte les évolutions du matériau de gainage, de la structure des assemblages, des conditions d'exploitation et des gestions de combustible, ainsi que le retour d'expérience d'exploitation et les résultats de la recherche.

EDF a donc :

- réalisé une revue des critères retenus vis-à-vis des accidents des catégories 1 à 4¹ (hors accident de perte de réfrigérant primaire, APRP) afin de compléter, si besoin, la démonstration de sûreté sur les aspects relatifs à la tenue du combustible ;
- examiné l'adéquation entre les phénomènes physiques mis en jeu et les exigences de sûreté associées, sur la base des principes de sûreté retenus vis-à-vis des accidents des catégories 1 à 4 ;
- vérifié la cohérence des phénomènes physiques pris en compte dans les études d'accident présentées dans les rapports de sûreté avec les hypothèses des études de conséquences radiologiques.

L'ASN a recueilli l'avis de l'IRSN ainsi que celui du groupe permanent d'experts pour les réacteurs nucléaires,

¹ Les conditions de fonctionnement sont classées de la manière suivante :

- catégorie 2 : situations incidentelles, dont la fréquence d'occurrence est comprise entre 1 et 10⁻² / année.réacteur ;
- catégorie 3 : situations accidentelles, dont la fréquence d'occurrence est comprise entre 10⁻² et 10⁻⁴ / année.réacteur ;
- catégorie 4 : situations accidentelles, dont la fréquence d'occurrence est comprise entre 10⁻⁴ et 10⁻⁶ / année.réacteur.

qu'elle a réuni le 15 juin 2017, sur le réexamen des critères de tenue du combustible relatifs aux différents phénomènes physiques redoutés et sur la prise en compte de l'état prévisible du combustible dans les différentes situations prévues par la démonstration de sûreté. Ils ont également examiné la cohérence entre le comportement du combustible dans les conditions de fonctionnement de référence et les hypothèses des études des conséquences radiologiques correspondantes.

L'expertise a notamment plus particulièrement porté sur :

- la fragilisation des gaines par corrosion ou par oxydation à haute température ;
- la prise en compte du risque de rupture de gaine par interaction mécanique de la gaine et de la pastille de combustible pour les accidents des catégories 2 à 4 ;
- la prise en compte du risque de rupture de gaine par interaction pastille-gaine avec corrosion sous contrainte en catégorie 3 ;
- les limites fixées en termes de nombre de crayons entrant en crise d'ébullition au regard des principes de sûreté associés aux accidents des catégories 3 et 4 ;
- la pertinence du critère de non-fusion du combustible pour les accidents des catégories 3 et 4 ;
- l'exhaustivité de la démonstration de sûreté vis-à-vis de la prise en compte de la déformation des assemblages, de la présence de gaines de combustible inétanches en réacteur et de la dispersion possible de combustible.

À l'issue de la réunion du 15 juin 2017, le GPR a rendu son avis, cité en référence [2]. Par courrier en référence [3], vous avez par ailleurs pris des engagements sur certains points soulevés au cours de l'expertise. Je vous prie de bien vouloir trouver ci-après la position de l'ASN ainsi que ses demandes sur l'ensemble de ces sujets.

L'alliage Zircaloy-4 n'est pas traité dans la présente lettre car il a vocation à être totalement remplacé par des alliages de conception plus récente.

*

A. Critères relatifs à la corrosion des gaines

Les gaines des crayons de combustible sont constituées d'alliage de zirconium. Elles sont sensibles à un phénomène de corrosion en exploitation qui se manifeste par la formation d'une couche de zircone en surface externe de la gaine et par l'absorption par les gaines d'une partie de l'hydrogène libéré par cette réaction d'oxydation. La cinétique de corrosion dépend de la température de la gaine. Le paramètre pertinent pour évaluer l'impact de la corrosion sur les caractéristiques mécaniques des gaines est leur teneur en hydrogène. À cet effet, les trois critères techniques d'acceptation associés respectivement au fonctionnement normal, aux conditions de fonctionnement de catégorie 2 et aux conditions de fonctionnement des catégories 3 et 4¹ ont été examinés.

Corrosion des gaines en fonctionnement normal

En fonctionnement normal, la température de la gaine est de l'ordre de 350 °C. Le critère historique de la démonstration de sûreté vérifié en fonctionnement normal est une épaisseur de zircone qui ne doit pas dépasser 100 µm.

L'utilisation pour le gainage des crayons de combustible des nouveaux alliages à base de zirconium – le M5 et l'Optimized ZIRLO – conduit à des épaisseurs de zircone observées en exploitation significativement plus faibles que ce critère historique. De plus, la teneur en hydrogène des gaines, pour ces épaisseurs de zircone, est suffisamment faible pour que leurs caractéristiques mécaniques ne soient pas dégradées.

Vous proposez, dans votre note en référence [4], de ne plus vérifier le critère d'épaisseur de zircone des gaines composées d'alliage M5 et Optimized ZIRLO. Dans la mesure où la sensibilité à la corrosion de ces alliages

est faible, **L'ASN considère votre proposition acceptable.**

Corrosion des gaines en conditions de fonctionnement de catégorie 2

Les gaines en Zircaloy-4 sont sujettes à une corrosion accélérée au-delà d'une température comprise entre 450 °C et 500 °C. Afin d'éviter ce phénomène, un critère de température maximale de l'interface entre le métal et l'oxyde a été défini à 425 °C.

Les essais réalisés sur les nouveaux alliages de zirconium – M5, ZIRLO et Optimized ZIRLO – montrent l'absence d'accélération de la corrosion à 500 °C et les calculs que vous avez réalisés, avec des hypothèses conservatives, montrent que la température de l'interface entre le métal et l'oxyde ne dépasse pas 489 °C en conditions de fonctionnement de catégorie 2.

En conséquence, vous proposez, dans votre note en référence [5], de ne plus vérifier pour les nouveaux gainages, le critère de température de l'interface entre le métal et l'oxyde en conditions de fonctionnement de catégorie 2. **L'ASN considère votre proposition acceptable.** En cas d'utilisation future d'un nouvel alliage pour les gaines, il conviendra de vérifier que son comportement est bien similaire à celui des alliages précités. Par ailleurs, en cas d'évolution de la valeur limite de la puissance linéique considérée pour les conditions de fonctionnement de catégorie 2, il conviendra de vérifier la température d'interface entre le métal et l'oxyde.

Corrosion des gaines en conditions de fonctionnement de catégorie 3 ou 4

Lors de certains accidents appartenant aux conditions de fonctionnement de catégories 3 ou 4, les gaines des crayons de combustible peuvent atteindre des températures supérieures à 900 °C consécutivement à leur entrée en crise d'ébullition². Les gaines sont alors fragilisées par leur oxydation à haute température. Cette fragilisation entraîne un risque de rupture de gaine lors de la phase de refroidissement consécutive à la fin de la crise d'ébullition, et *in fine* à un risque de dispersion de combustible dans le circuit primaire. Le critère technique d'acceptation actuel à vérifier, qui garantit la tenue de la gaine dans ces conditions de fonctionnement, est une température de la gaine inférieure à 1482 °C. Ce critère est issu d'essais utilisés dans la démonstration de sûreté pour l'accident d'APRP.

Vous proposez, dans vos notes en références [6] et [7], de compléter ce critère par une limite en taux d'oxydation équivalent (ou ECR, equivalent cladding reacted). Cette limite permet de prendre en compte le temps pendant lequel la gaine subit des températures élevées et donc une oxydation rapide. Les critères que vous proposez consistent à vérifier deux inégalités.

L'ASN considère que le principe de votre démarche, qui consiste à compléter la limite en température par une limite en ECR, calculée avec la corrélation de Baker-Just, est pertinent. **L'ASN considère cependant que la valeur limite en ECR doit être réévaluée, comme vous vous y êtes engagé par les actions 1 et 2 présentées dans votre courrier [3].**

B. Critères relatifs à l'interaction pastille-gaine (IPG)

B.1. Interaction mécanique pastille-gaine (ImPG)

Lors d'un incident ou accident entraînant une augmentation (généralisée ou locale) de puissance, l'IPG correspond à la mise en traction de la gaine des crayons de combustible sous l'effet de l'interaction avec la

² Le phénomène de crise d'ébullition consiste en la formation d'un film continu de vapeur à la surface de la gaine du combustible du fait de l'ébullition du fluide primaire, ce qui entraîne une dégradation soudaine des échanges thermiques entre la gaine et le fluide caloporteur. L'évacuation de la chaleur produite par le combustible se détériore et la température de la gaine et des pastilles augmente alors brutalement.

pastille de combustible, qui se dilate plus fortement que la gaine.

Lorsque l'interaction entre la pastille et la gaine est essentiellement mécanique, on parle alors d'ImPG. L'ImPG est consécutive à un pulse de puissance, c'est-à-dire à une montée en puissance rapide, non suivie par un palier de maintien en puissance. Il convient alors, pour ces situations et pour des taux de combustion moyens ou élevés, de limiter la déformation de la gaine de combustible afin de prévenir la rupture de gaine, qui peut conduire à une dispersion de combustible dans le circuit primaire, en particulier en cas de transitoires d'insertion de réactivité.

Critère de non-rupture de gaine par ImPG en situation de catégorie 2 par retrait incontrôlé de groupe à puissance nulle (RIGZ)

La démonstration de sûreté des réacteurs nucléaires ne comporte pas de critère de tenue du combustible à l'ImPG en transitoire de RIGZ. Vous proposez, dans votre note en référence [8], de compléter la démonstration de sûreté en introduisant la vérification, avec le logiciel SCANAIR V6.7, d'un critère fixé à 1% de déformation circonférentielle plastique de la gaine, qui garantit l'absence de rupture de gaine par ImPG en RIGZ, pour des gaines dont la teneur en hydrogène est inférieure à 805 ppm.

L'ASN note que ce critère présente des marges notables par rapport aux résultats d'essai avec rupture que vous avez pris en compte. Ce critère a par ailleurs été utilisé dans le cadre de la demande d'autorisation de mise en service du réacteur EPR de Flamanville 3. **L'ASN considère votre proposition acceptable.**

Critère de non-rupture de gaine par ImPG en catégorie 2, hors RIGZ

Le critère historique de vérification de la tenue de la gaine à l'ImPG pour les transitoires de catégorie 2 de type rampes de puissance (hors RIGZ) est une déformation circonférentielle uniforme de la gaine inférieure à 1%. Vous proposez, dans votre note en référence [9], de modifier ce critère qui tiendra compte de la teneur en hydrogène des gaines des crayons de combustible, à savoir :

- si la concentration en hydrogène est inférieure à 250 ppm, la déformation doit rester inférieure à 2% ;
- si la concentration en hydrogène est supérieure à 250 ppm, la déformation doit rester inférieure à 1%.

L'ASN considère que, même si le nombre d'essais sur lesquels vous vous êtes appuyés pour établir ces critères est relativement faible, ces critères sont basés sur une interprétation prudente des résultats d'essais. **L'ASN considère votre proposition acceptable.**

Critères de non-rupture de gaine par ImPG en accident d'éjection de grappe (EDG)

La démonstration de sûreté actuelle des réacteurs relative à l'accident d'EDG se décompose en deux volets :

- un volet dit « point chaud » : l'absence de dispersion du combustible est vérifiée, pour les assemblages de combustible dont le taux d'irradiation moyen est inférieur à 33 GW_j/t, par la vérification d'un critère en enthalpie maximale du combustible de 200 cal/g ;
- un volet dit « hauts taux de combustion » : l'absence de rupture de gaine des crayons dont le taux d'irradiation moyen est supérieur à 47 GW_j/t est vérifiée par le respect des conditions suivantes : une épaisseur d'oxydation inférieure à 100 µm, une variation d'enthalpie inférieure à 57 cal/g, une largeur de pulse³ supérieure à 30 ms et une température de gaine inférieure à 700 °C.

La tenue des crayons de combustible dont le taux de combustion est compris entre 33 et 47 GW_j/t n'est actuellement pas démontrée. Dans sa lettre en référence [10], l'ASN vous demandait :

- d'apporter les éléments complémentaires justifiant la tenue en situation d'éjection de grappe des crayons des assemblages de combustible dont l'épuisement moyen est compris entre 33 et 47 GW_j/t ;
- de justifier l'applicabilité et le caractère suffisant d'une limite en variation d'enthalpie issue de résultats

³ La largeur de pulse de puissance à mi-hauteur caractérise le temps d'éjection de la grappe au cours de l'accident d'EDG.

d'essais réalisés à puissance nulle à des transitoires initiés à puissance intermédiaire, pour le risque de rupture de gaine par ImPG.

Vous avez ainsi proposé plusieurs critères techniques d'acceptation, différenciés selon le combustible et le gainage, pour garantir l'absence de rupture de gaine par ImPG en cas d'EDG. Leur détermination repose sur l'interprétation d'essais expérimentaux. Ces nouveaux critères sont valables pour des taux d'irradiation supérieurs à 33 GWj/t. Les critères pour des taux d'irradiation inférieurs à 33 GWj/t restent inchangés.

Vous proposez, dans votre note en référence [11], de retenir comme critère technique d'acceptation, pour les assemblages de combustible UO₂ dont les gaines sont en alliage ZIRLO ou Optimized ZIRLO, une variation d'enthalpie de 80 cal/g associée à une largeur de pulse supérieure ou égale à 30 ms. Ce critère est valide jusqu'à une teneur en hydrogène des gaines de 1000 ppm. Ce critère a été établi à l'aide du logiciel SCANAIR à partir de données issues d'essais, sans toutefois prendre les incertitudes sur les données expérimentales. **L'ASN considère que, pour être acceptable, ce critère doit être revu en prenant en compte les incertitudes sur les données expérimentales qui ont permis de l'évaluer.**

Demande 1 : Pour garantir l'absence de rupture de gaine par interaction mécanique entre la pastille et la gaine des crayons de combustible UO₂ à gainage ZIRLO et Optimised ZIRLO pendant un transitoire d'éjection de grappe, l'ASN vous demande que la définition du critère technique à vérifier, exprimé en variation d'enthalpie du combustible, prenne en compte les incertitudes expérimentales sur l'énergie injectée au cours des essais utilisés pour le définir ainsi que sur l'épaisseur d'oxyde externe du gainage du crayon.

Dans cette même note [11], vous proposez de retenir comme critère technique d'acceptation pour les assemblages de combustible UO₂ à gaines en alliage M5 une variation d'enthalpie de 150 cal/g, valide jusqu'à une teneur en hydrogène de la gaine de 160 ppm. **L'ASN considère que ce critère doit être associé à une limite en largeur de pulse, comme vous vous y êtes engagé par l'action 3 de votre courrier [3].**

Dans votre document en référence [12], vous proposez, pour les assemblages de combustible MOX, à gainage M5, de retenir comme critère technique d'acceptation garantissant l'absence de rupture de gaine par ImPG, une variation d'enthalpie de 113 cal/g associée à une largeur de pulse supérieure ou égale à 30 ms. Ce critère est issu de l'interprétation d'essais par des calculs. Toutefois, dans les essais que vous avez valorisés, l'ImPG n'est pas le phénomène prédominant à l'origine des déformations et des éventuelles ruptures de gaines. **L'ASN considère que les critères de tenue du combustible MOX à gainage M5 doivent être redéfinis par une démarche appropriée, comme vous vous y êtes engagé par l'action 4 de votre courrier [3].**

Validité des critères pour les accidents d'EDG initiés à puissance non-nulle

Vous justifiez, par votre note en référence [13], que les accidents d'EDG initiés à puissance non nulle ne sont pas plus pénalisants en termes de chargement vu par la gaine que les accidents d'EDG initiés à puissance nulle. Vous indiquez que, en conséquence, les critères que vous proposez, cités ci-dessus et conçus pour les accidents d'EDG initiés à puissance nulle, sont valables pour toutes les configurations d'EDG étudiées. Cependant, cette note en référence [13] s'appuie sur une étude faite pour le réacteur EPR de Flamanville 3 qui n'est pas directement transposable à tous les réacteurs français. **L'ASN considère que vous devez apporter les justifications appropriées pour chaque palier et chaque gestion de combustible pour les accidents d'EDG initiés à des niveaux de puissance non nuls des réacteurs.**

Demande 2 : L'ASN vous demande, dans le cadre des prochains réexamens périodiques qui utiliseront les nouveaux critères de tenue du combustible, d'apporter les justifications appropriées pour les accidents d'EDG initiés en puissance.

Limites de validité des critères de non-rupture de gaine par ImPG

Les critères de tenue du combustible à l'ImPG que vous proposez reposent sur l'interprétation d'essais mécaniques ou semi-intégraux, dont la majorité a été réalisé avec des gaines en Zircaloy-4. La teneur en hydrogène est un paramètre dominant pour la définition de tels critères, car l'absorption d'hydrogène par les gaines les fragilise et réduit leur résistance à l'ImPG. Cependant, pour la majorité des échantillons, la teneur en hydrogène est obtenue indirectement à partir de la mesure de l'épaisseur d'oxyde. Pour ce faire, vous avez établi une corrélation entre l'épaisseur d'oxyde et la teneur en hydrogène puis estimé la teneur en hydrogène des échantillons ayant fait l'objet d'essais.

L'ASN estime que le nombre de points retenus pour établir cette corrélation est faible et que les incertitudes de mesures qui y sont associées auraient dû être prises en compte. Par ailleurs, certains points de mesure présentent un comportement singulier. De plus, le coefficient de détermination de la corrélation et les incertitudes sur les paramètres de la corrélation n'ont pas été estimés.

Demande 3 : L'ASN vous demande de justifier 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 lorsque ces critères ont été établis à partir d'essais sur des échantillons de gaine en Zircaloy-4.

B.2. Interaction pastille-gaine assistée par la corrosion sous contrainte (IPG-CSC)

Les incidents caractérisés par une rampe de puissance suivie d'un maintien en puissance présentent un risque de rupture de gaine par IPG-CSC, qui conduit à un percement sans risque de dispersion de combustible. Pour les situations de catégorie 2, vous justifiez la prise en compte de ce risque par la mise en œuvre de règles d'exploitation qui limitent les contraintes ou la densité d'énergie dans le gainage : le fonctionnement prolongé à puissance intermédiaire (FPPI) est limité par les spécifications techniques d'exploitation (STE) car il s'agit d'un mode de fonctionnement défavorable vis-à-vis du risque de rupture de gaine par IPG-CSC.

Par votre note en référence [14], vous avez complété vos études pour les situations de catégorie 3 en examinant le risque d'IPG-CSC pour l'accident de retrait incontrôlé d'une grappe en puissance (R1GP). Selon les types de R1GP étudiés, les marges de l'accident sont supérieures à celles issues des études pour les transitoires de catégorie 2 et vous en concluez que l'absence de rupture des gaines par IPG-CSC lors de l'accident de R1GP est garantie par les études existantes. **L'ASN considère que votre conclusion est acceptable pour les gestions de combustible actuellement mises en œuvre pour les réacteurs en fonctionnement.**

Les accidents de rupture de tuyauterie de vapeur peuvent induire des augmentations de puissance comparables à celles rencontrées en catégorie 2. Ils présentent donc un risque de rupture de gaine par IPG-CSC qui n'est actuellement pas étudié dans la démonstration de sûreté. L'instruction relative au risque d'IPG-CSC en accident de rupture de tuyauterie de vapeur initiée en puissance (RTV), classé en catégorie 4, n'est en revanche pas encore finalisée. **L'ASN estime que les échanges techniques sur le sujet doivent être poursuivis.**

C. Critères relatifs à la crise d'ébullition

Risque de rupture des gaines liée à la une crise d'ébullition

Le flux thermique critique est la valeur du flux thermique conduisant à une crise d'ébullition à la surface de la gaine de combustible. Le rapport de flux thermique critique (RFTC) est le rapport entre ce flux thermique

critique et le flux thermique à la surface de la gaine de combustible. Pour les conditions de fonctionnement de catégories 1 et 2, l'absence de crise d'ébullition est vérifiée par le calcul du RFTC.

Lorsqu'un crayon de combustible est sujet à une crise d'ébullition, les échanges thermiques avec le réfrigérant primaire sont dégradés. La température des gaines dépasse alors généralement 900 °C, ce qui en modifie les caractéristiques mécaniques notamment du fait d'une plus grande ductilité. Deux modes d'endommagement des gaines sont alors susceptibles de se produire :

- un affaissement (« collapse ») de la gaine, si la pression dans le crayon est inférieure à la pression du réfrigérant primaire. La gaine est alors écrasée sur le combustible et épouse progressivement les formes de la colonne fissile. Selon les éléments expérimentaux disponibles, ce phénomène n'amène pas à la rupture de la gaine mais entraîne néanmoins sa fragilisation du fait d'une réaction chimique avec les pastilles de combustible ;
- un ballonnement des gaines, si la pression dans le crayon est supérieure à la pression du réfrigérant primaire. Le ballonnement peut conduire à la rupture (ou éclatement) de la gaine, par déformation excessive.

La démonstration de sûreté limite le nombre de crayons susceptibles d'entrer en crise d'ébullition (NCE) à 5 % et 10 % pour les accidents respectivement des catégories 3 et 4. Vos études des conséquences radiologiques considèrent de manière forfaitaire et conservatrice que tout crayon entrant en crise d'ébullition est susceptible d'être rompu. Votre document en référence [15] constitue une synthèse de ces critères de NCE.

Vous présentez, dans votre note en référence [16], une étude relative à l'accident d'EDG concluant que les crayons de combustible dont le taux d'irradiation est inférieur à un certain seuil ne rompraient pas s'ils étaient soumis à une crise d'ébullition. En dessous d'un certain taux d'irradiation, la pression interne du crayon atteinte lors de l'accident resterait inférieure à celle du réfrigérant primaire, éliminant ainsi le risque de ballonnement et donc de rupture. Vous indiquez, dans votre fiche de synthèse en référence [17], que vous souhaitez modifier les critères relatifs à la crise d'ébullition de 5 % et 10 % de NCE par respectivement 5 % et 10 % de crayons susceptibles d'être rompus, respectivement pour les accidents de catégorie 3 et 4. Cette modification serait selon vous sans impact sur les études des conséquences radiologiques car n'en modifiant pas les hypothèses en termes de nombre de crayons de combustible rompus.

Votre étude [16] se veut illustrative du fait qu'un crayon susceptible d'entrer en crise d'ébullition ne subira pas forcément une rupture consécutivement à son ballonnement, ce dont l'ASN convient. L'ASN estime cependant que la démarche présentée par EDF ainsi que son instruction ne sont pas suffisamment abouties pour faire évoluer le critère actuel de la démonstration de sûreté. En particulier, l'ASN considère que la valorisation d'un comportement physique des gaines dans la démonstration de sûreté nécessite notamment de quantifier la probabilité d'occurrence de ce comportement, son niveau de confiance, son conservatisme, et d'être en mesure de démontrer et de vérifier pour les matériels concernés, dans l'état où ils se trouvent, que les modèles de comportement utilisés sont dans leur domaine d'application.

À défaut, l'ASN considère qu'il convient de conserver un critère qui est calculable et dont le caractère conservatif est reconnu.

En montrant que la rupture de certains crayons subissant une crise d'ébullition peut être exclue, vous mettez en évidence un conservatisme non quantifié des hypothèses d'études des conséquences radiologiques. Le changement consistant à ne comptabiliser que le nombre de crayons potentiellement rompus selon le nouveau critère plutôt que le nombre de NCE conduirait à accepter, en cas d'évolutions des conditions d'exploitation des réacteurs en fonctionnement, une augmentation des conséquences radiologiques réelles des accidents concernés tout en respectant les critères de sûreté.

En cohérence avec les objectifs de diminution des rejets radiologiques discutés lors des cadrages des réexamens périodiques, l'ASN estime que l'évolution de critères consistant à vérifier pour les accidents des catégories 3 et 4 un nombre de crayons potentiellement rompus de respectivement 5 %

et 10 % au lieu d'un nombre de crayons susceptibles d'entrer en crise d'ébullition de respectivement 5 % et 10 % n'est pas souhaitable.

Demande 4 : L'ASN vous demande de maintenir 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.

Risque de dispersion de combustible à la suite des ruptures de gaine consécutives à une crise d'ébullition

Vous avez analysé, dans votre note en référence [18], le risque de dispersion du combustible lorsque les crayons de combustible, soumis à une crise d'ébullition, ballonnent et rompent. **L'ASN considère que les éléments que vous avez transmis justifient l'absence de dispersion de combustible dans ces situations, et par conséquent, le fait que les conséquences d'une telle dispersion ne sont pas étudiées dans la démonstration de sûreté.**

D. Critères relatifs à la fusion du combustible

En fonctionnement normal, la température maximale dans les pastilles de combustible est atteinte en leur centre et varie de 700 °C à 1250 °C. La température de fusion est comprise entre 2700 °C et 2810 °C en fonction du type de combustible et de son épaissement. Dans le référentiel de sûreté actuel, la fusion du combustible doit être exclue en conditions de fonctionnement des catégories 1 et 2. Aucune exigence ni aucun critère technique d'acceptation associé ne sont définis pour les accidents de catégorie 3. Enfin, pour les accidents de catégorie 4, la fusion du combustible est limitée à 10 % de fraction fondue en volume au point chaud.

Lorsqu'il fond, le combustible occupe un volume plus important, exerçant ainsi des contraintes sur la gaine du crayon. La limite de 10 % de combustible fondu pour les accidents de catégorie 4 permet de limiter cette expansion et donc de limiter l'endommagement de la gaine du crayon de combustible.

Dans votre note en référence [19], vous expliquez que, pour la majorité des situations accidentelles, la température maximale est atteinte au centre des pastilles de combustible. Seuls les transitoires de RIGZ et d'EDG peuvent générer une température maximale localisée dans une autre zone des pastilles.

La fusion du combustible en périphérie des pastilles de combustible induit un risque de dispersion de particules de combustible chaud ou fondu dans le réfrigérant primaire et d'interaction entre ces particules et le réfrigérant primaire, susceptible de mettre en cause la capacité de refroidissement du cœur et, in fine, l'intégrité de la deuxième barrière de confinement. **L'ASN considère que, pour les conditions de fonctionnement de référence de catégories 3 et 4, la fusion du combustible doit être écartée lorsqu'elle n'est pas localisée au cœur du combustible. À cet égard, vous vous engagez par l'action 6 de votre courrier [3] à vérifier dans les études de sûreté que la température maximale en périphérie de la pastille reste inférieure à la température de fusion.**

Actuellement, le risque de fusion du combustible n'est pas vérifié pour les accidents de catégorie 3 et aucun critère relatif à la fusion du combustible n'est défini. Vous avez identifié, dans votre note en référence [21], que, pour les réacteurs en fonctionnement, parmi les accidents de catégorie 3, le R1GP est concerné par un risque potentiel de fusion à cœur de la pastille. Vous proposez de retenir comme critère en catégorie 3 une fraction de combustible fondu à cœur de la pastille inférieure à 10 % en volume, sachant par ailleurs que les crayons susceptibles de présenter une fusion du combustible à cœur sont forcément entrés au préalable en crise d'ébullition. Ainsi, concernant les hypothèses des études des conséquences radiologiques, seront considérés :

- 1 % de combustible fondu en catégorie 4 (10 % de combustible fondu parmi 10 % de crayons en crise d'ébullition),

- 0,5 % de combustible fondu en catégorie 3 (10 % de combustible fondu parmi 5 % de crayons en crise d'ébullition).

L'ASN considère que ce critère est acceptable pour les réacteurs existants et qu'il présente bien une gradation entre les conditions de fonctionnement des catégories 3 et 4. En revanche, en cohérence avec le guide en référence [22], l'ASN considère que la fusion du combustible en situation de catégorie 3 doit être évitée pour tous les nouveaux réacteurs.

Par ailleurs, l'ASN considère que la fusion potentielle du combustible en accident de R1GP doit être prise en compte dans l'étude des conséquences radiologiques, comme vous vous y êtes engagé par l'action 7 de votre courrier [3].

E. Prise en compte de la déformation latérale des assemblages de combustible

Dans le cadre des quatrième réexamens périodiques des réacteurs de 900 MWe, l'ASN vous a demandé de prendre en compte dans la démonstration de sûreté la déformation latérale des assemblages de combustible [23]. Vous avez étudié l'impact de la déformation des assemblages sur la base d'une méthodologie qui consiste à évaluer la dimension des lames d'eau, c'est-à-dire les espacements inter-assemblages en cœur de réacteur, puis leur impact sur les aspects neutronique, thermohydraulique et mécanique des études de la démonstration de sûreté.

Épaisseur des lames d'eau en cœur

Du fait des différentes contraintes exercées sur les cœurs, les assemblages de combustible se déforment latéralement au cours de leur irradiation. Les mesures de ces déformations dans le cœur des réacteurs en exploitation ne sont pas réalisables directement. Ainsi, vous avez développé une méthode, décrite dans les documents en références [24] et [25], permettant d'évaluer ces déformations à l'aide du modèle nommé « MAC3_coeur » à partir de mesures réalisées hors cœur de réacteur avec un outil nommé « DAMAC ».

La première étape de votre méthodologie pour la prise en compte des conséquences de la déformation des assemblages de combustible a consisté à évaluer, pour un certain nombre de réacteurs et de campagnes, la distribution des lames d'eau au niveau de chaque grille d'assemblage de combustible. Ces évaluations montrent, notamment, que les distributions des lames d'eau sont semblables entre les différents réacteurs étudiés, alors qu'une partie de ces réacteurs présentait des niveaux globaux de déformation importants selon vos mesures « DAMAC ». La majorité des lames d'eau est inférieure à 5 mm et quelques lames d'eau peuvent dépasser 10 mm.

L'ASN considère que vos évaluations des lames d'eau sont à l'état de l'art des modèles existants, le modèle « MAC3_coeur » devant néanmoins faire l'objet d'une note de validation, comme vous vous y êtes engagé par l'action 8 de votre courrier [3].

Impact neutronique

Vous indiquez que la déformation des assemblages peut avoir un impact sur la puissance des crayons à la fois à l'échelle des crayons d'un assemblage et à l'échelle du cœur (ou d'un groupe d'assemblages). L'impact à l'échelle du cœur est déjà pris en compte dans les réglages des seuils de protection existants. Vous avez présenté, dans les documents en références [26] et [27], une démarche en trois étapes afin d'évaluer l'impact de la déformation des assemblages sur la puissance des crayons :

- calculs neutroniques pour estimer l'effet des lames d'eau inter-assemblages sur la puissance des crayons ;
- réévaluation de l'incertitude de calcul de la puissance des crayons, intégrant l'effet pénalisant de la déformation attendue des assemblages ;
- analyse de l'impact de cette réévaluation sur la démonstration de sûreté.

Selon vos études, la prise en compte de lames d'eau élargies peut conduire à ce que le point chaud, habituellement situé à l'intérieur de l'assemblage, soit situé en bord d'assemblage, au droit de la lame d'eau élargie.

L'ASN considère que votre méthodologie est acceptable. Celle-ci ayant été mise en œuvre pour la gestion de combustible « Gemmes », il conviendra de s'assurer de la possibilité de l'appliquer pour les autres gestions de combustible mettant en œuvre uniquement de l'uranium. Par ailleurs, une déclinaison particulière est nécessaire pour la gestion de combustible « Parité MOX » afin de prendre en compte les particularités du flux neutronique de cette gestion de combustible.

L'ASN note toutefois que votre méthodologie ne prend pas en compte la demande de l'ASN formulée dans les lettres en références [28] et [29], dans le cadre des troisièmes réexamens périodiques des réacteurs de 1300 MWe et relative au cumul arithmétique de la pénalité de fléchissement lors du remontage de l'incertitude totale sur la chaîne de protection « puissance linéique élevée ». Ce point fait l'objet d'une instruction dans le cadre des réexamens périodiques en cours.

Conformément à la demande de l'ASN, vous vous êtes engagé, par courrier en référence [3], à prendre en compte la déformation des assemblages de combustible dans la démonstration de sûreté pour le quatrième réexamen périodiques des réacteurs de 900 MWe exploités selon les gestions « Parité MOX » et « Cyclades ». Pour les autres gestions de combustible, de manière transitoire, une pénalité sera considérée dans les vérifications de sûreté des recharges, avant l'intégration complète de la méthodologie dans la démonstration de sûreté à l'occasion des prochains réexamens périodiques, comme présenté dans l'action 9 de votre courrier [3].

Impact thermohydraulique

Le RFTC est calculé dans les canaux de réfrigérant primaire de chaque assemblage. Le canal de réfrigérant dont le RFTC est minimal est localisé au niveau du point chaud de cet assemblage généralement situé à l'intérieur de l'assemblage. La prise en compte de lames d'eau élargies peut conduire à ce que le point chaud théorique se déplace et soit au contact de ces lames d'eau, qui auront, de manière antagoniste, un effet refroidissant plus important.

Vous présentez, dans vos notes en références [30] et [31], une démarche en trois étapes afin de vérifier si le RFTC minimal n'est pas susceptible de se trouver au niveau d'un canal de réfrigérant situé entre deux assemblages du fait de la prise en compte du possible élargissement des lames d'eau. Vous concluez que la prise en compte de lames d'eau élargies ne remet pas en cause l'hypothèse selon laquelle le RFTC minimal se situe à l'intérieur du faisceau de crayons de l'assemblage chaud.

L'ASN considère nécessaire que vous démontriez le fait que le RFTC évolue de manière monotone avec l'épaisseur de la lame d'eau et que vous vérifiez qu'aucun effet falaise n'est à redouter au-delà

d'une certaine valeur de lame d'eau élargie, comme vous vous y engagez dans l'action 10 de votre courrier [3].

Les essais ayant permis d'établir la corrélation de flux critique pour le calcul du RFTC sont représentatifs des conditions à l'intérieur des assemblages de combustible et non au niveau des lames d'eau inter-assemblages. Pour pallier ce défaut de représentativité de la corrélation utilisée, vous avez réalisé des études de sensibilité pour appréhender l'influence de la géométrie et des conditions thermohydrauliques particulières en périphérie des assemblages de combustible. L'ASN note cependant que ces études de sensibilité ne permettent pas de statuer sur le conservatisme des marges obtenues par rapport au RFTC minimal de référence. **L'ASN considère que vous devez démontrer le conservatisme, comme vous vous y êtes engagé dans l'action 11 de votre courrier [3].**

Impact mécanique

La tenue mécanique des assemblages de combustible est nécessaire en conditions accidentelles afin notamment de s'assurer que les grappes de commande peuvent toujours s'insérer. L'étude limitative quant à la tenue mécanique de l'assemblage concerne le comportement des grilles aux sollicitations mécaniques horizontales en cas de séisme et en particulier le respect du critère de flambage sous les forces d'impact entre les grilles des assemblages et entre les grilles des assemblages et le cloisonnement du cœur. Le jeu inter-assemblages a une influence directe sur l'estimation de ces forces d'impact.

Les résultats que vous avez obtenus avec le logiciel « CASAC », qui permet d'estimer les forces d'impact entre les grilles d'assemblages et le cloisonnement, n'ont pas fait l'objet d'une validation par comparaison avec des résultats expérimentaux. **L'ASN considère que vous devez effectuer une validation du logiciel « CASAC », comme vous vous y engagez dans l'action 12 de votre courrier [3].**

La modélisation des forces d'impact sur les grilles d'assemblages de combustible que vous avez réalisée présente certaines simplifications inhérentes notamment au logiciel CASAC que vous utilisez. En particulier, les hypothèses de cette modélisation ne couvrent pas la variabilité des épaisseurs de lames d'eau que vous avez estimées. **L'ASN considère que vos modélisations doivent prendre en compte l'état réel des réacteurs.**

Demande 5 : L'ASN vous demande de quantifier les déformations des assemblages de combustible afin de les prendre en compte dans le calcul des forces d'impact sur les grilles d'assemblage en situation accidentelle. Vous utiliserez un modèle de rangée d'assemblages préalablement validé. La démonstration de sûreté sera mise à jour en conséquence.

F. Présence de crayons inétanches

La démonstration de sûreté actuelle repose sur l'hypothèse que les gaines des crayons de combustible sont sans défaut d'étanchéité et ne comportent pas de fragilité particulière. Des défauts traversants sont pourtant régulièrement observés. Vous avez présenté, dans votre note en référence [32] un retour d'expérience des crayons inétanches qui indique, par exemple, que la proportion d'assemblages de combustible déchargés inétanches en 2015 était de 0,11 %, soit neuf assemblages sur l'ensemble du parc.

Du fait de certains phénomènes (présence de corps migrants, usure vibratoire de la gaine par frottement avec les ressorts de maintien...), une inétanchéité liée à un défaut dit primaire peut apparaître et permettre le passage de produits de fission dans le réfrigérant primaire. Un défaut dit secondaire est ensuite susceptible de survenir en fonctionnement normal, à cause de la fragilisation de la gaine causée par l'hydruration d'une zone à l'intérieur de la gaine. Ce défaut secondaire peut être plus important que le défaut primaire et est susceptible d'entraîner une dissémination de combustible.

Évaluation des conséquences en cas d'EDG

Vous avez étudié, dans vos notes en références [33] et [34], les conséquences de la présence de crayons de combustible initialement inétanches en cas d'accident d'éjection de grappe (EDG). Ces crayons sont susceptibles de rompre et de causer l'expulsion dans le réfrigérant primaire de combustible et de gaz chauds pendant le pulse de puissance du transitoire. Votre étude repose sur la prise en compte de l'interaction thermique violente entre le combustible et le réfrigérant primaire, l'effet de l'éjection de matière ainsi que la pressurisation locale du fluide primaire en résultant.

Vous prenez comme hypothèse [33] que, au moment de sa rupture, la température interne du crayon défectueux est égale à sa température avant le pulse de puissance. Cette hypothèse a un impact sur les résultats des modélisations. Toutefois, la justification de cette hypothèse est insuffisante. **L'ASN considère que vous devez retenir une hypothèse plus conservative et remettre à jour les études concernées, comme vous vous y engagez dans l'action 13 de votre courrier [3].**

Vous avez simulé l'interaction thermique entre le combustible chaud et le réfrigérant primaire par un apport de puissance au sein d'une zone de fluide. La puissance locale de cette interaction dépend au premier ordre de :

- la quantité d'énergie due à l'éjection de combustible et transmise au fluide ;
- du volume de fluide recevant cette énergie ;
- la cinétique du transfert d'énergie vers le réfrigérant primaire.

Dans vos estimations de la quantité d'énergie dispersée par l'éjection de combustible en cas d'accident d'EDG en présence de crayons inétanches, vous avez considéré, selon les études, que 25 % ou 100 % du combustible au droit de la gaine était éjecté dans le réfrigérant primaire. **L'ASN estime qu'en l'état des connaissances, il n'est pas possible de retenir une valeur du taux de combustible éjecté inférieure à 100 %.**

Par ailleurs, vous avez utilisé le logiciel « Europlexus » afin d'estimer la part d'énergie transférée au réfrigérant primaire. Celui-ci ne permet pas, en l'état, de modéliser simplement la quantité d'énergie cédée au fluide ni l'ensemble des phénomènes susceptibles d'affecter le résultat.

Votre modélisation de la quantité de fluide recevant l'énergie éjectée du crayon consiste à « injecter » l'énergie due à l'interaction thermique dans un volume de fluide égal à celui occupé par le combustible éjecté. Votre choix de modéliser une injection de puissance massique dans un volume fixe peut ne pas être homogène avec certains aspects phénoménologiques, et notamment le pic de pression atteint est d'autant plus important que la puissance reçue par unité de masse du fluide est élevée.

Concernant la cinétique de transfert de chaleur, vous avez utilisé un modèle qui ne permet pas de considérer que la température de la vapeur se formant au contact du combustible chaud est surchauffée, c'est-à-dire à une température supérieure à celle du liquide qui l'entoure. Ce phénomène de surchauffe correspond cependant au phénomène physique attendu en cas d'éjection de combustible.

Au regard des points cités ci-dessus, l'ASN estime que des justifications sont nécessaires pour étayer votre étude des conséquences de la dispersion de combustible chaud dans le réfrigérant primaire.

Demande 6 : Pour l'étude des conséquences de la dispersion de combustible chaud dans le réfrigérant primaire à la suite d'une éjection de grappe en présence de crayons initialement inétanches, l'ASN vous demande d'apporter les éléments montrant que les modélisations que vous avez 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.

Vous vous êtes par ailleurs engagé à détailler les hypothèses retenues pour délimiter la zone d'évolution de l'onde de pression, comme indiqué dans l'action 14 de votre courrier [3].

Vous avez réalisé des études [36] pour évaluer le risque d'effet domino mécanique sur les crayons voisins à la suite de la rupture d'un crayon inétanche consécutif à une éjection de grappe et concluez qu'un tel effet n'est pas susceptible de se produire. L'ASN note par ailleurs que vous avez apporté des éléments de validation de votre approche par courrier en référence [35]. **Sous réserve de la prise en compte de la demande 6 du présent courrier, l'ASN considère recevables vos conclusions sur le risque d'effet domino mécanique.**

Vous avez aussi étudié le risque d'effet domino thermique sur les crayons qui se trouvent au sein de la poche de vapeur formée en regard de la zone rompue, à la suite de la rupture d'un crayon inétanche, consécutif à une éjection de grappe. Vous concluez qu'à proximité immédiate du crayon rompu, les crayons voisins sont susceptibles d'être asséchés. Ce phénomène ne conduit cependant pas à une nouvelle dispersion significative de combustible dans le réfrigérant.

Comme mentionné précédemment, l'ASN considère que votre évaluation de l'extension de la zone d'interaction entre le combustible chaud et le réfrigérant primaire, et donc de l'étendue de la zone asséchée est incomplète, **ce point fait l'objet de la demande 6 ci-dessus**. Cependant, l'analyse de plusieurs essais sur lesquels vous vous êtes appuyé indique que la rupture, par effet domino thermique, d'un crayon avec dispersion significative de matières chaudes n'est pas susceptible de se produire. Ces éléments tendent à valider votre conclusion quant à l'absence d'effet domino thermique en cas d'accident d'éjection de grappe en présence de crayons inétanches.

L'ASN note toutefois que vous n'avez pas apporté de réponse complète à la demande D6 de la lettre de l'ASN en référence [37]. Une telle réponse serait de nature à conforter vos conclusions sur le risque d'effet domino thermique, qui reposent actuellement sur un nombre réduit de résultats d'essais et sur une analyse incomplète.

Demande 7 : L'ASN vous demande d'apporter une réponse à la demande D6 de la lettre de l'ASN en référence [37].

Vous avez estimé [33] [34] le risque d'endommagement de la cuve consécutif à un accident d'éjection de grappe en présence de crayons de combustible initialement inétanches. Vous avez étudié la surpression induite par la rupture de 44 crayons défectueux positionnés à proximité de la virole de la cuve, ce qui constitue une hypothèse conservatrice au regard du retour d'expérience, sous réserve de l'absence de rupture de crayons par effets domino. En revanche, vous avez pris des hypothèses sur l'atténuation des ondes de surpression entre la zone d'interaction thermique combustible-réfrigérant et la cuve du réacteur différentes des hypothèses classiques et qui conduisent à surestimer cette atténuation. **L'ASN considère que vous devez mettre à jour les calculs d'atténuation de la pression entre la zone d'interaction thermique combustible-réfrigérant et la cuve du réacteur pour vous assurer que les conclusions relatives à la tenue de la cuve ne sont pas remises en cause, comme vous vous y engagez dans l'action 15 de votre courrier [3].**

Enfin, vous avez estimé l'effet de la dispersion de combustible sur la capacité à refroidir le cœur et sur les conséquences radiologiques de l'accident d'EDG en présence de crayons initialement inétanches. **Ces points n'appellent pas de remarque de l'ASN.**

L'ASN considère que, sous réserve des actions et de la demande n° 6 formulées ci-dessus, la tenue mécanique de la cuve n'est pas mise en cause en cas d'accident d'éjection de grappe en présence de crayons initialement inétanches, de même que la capacité à refroidir le cœur. Par ailleurs, les conséquences radiologiques de l'accident d'EDG restent acceptables.

Évaluation des conséquences en conditions de fonctionnement des catégories 2 à 4, hors EDG

Vous avez analysé les conséquences de la présence de crayons initialement inétanches pour les accidents des catégories 2 à 4 [32]. Pour les accidents de catégorie 2, vous concluez que les accidents d'insertion de réactivité sont susceptibles d'avoir un impact sur la gaine de combustible. Les zones hydrurées des gaines, consécutivement à un défaut primaire, pourraient rompre lors de certains accidents (RIGZ, retrait incontrôlé de grappes en puissance, augmentation excessive de charge, chute de grappes, mauvais fonctionnement de l'eau alimentaire normale en puissance) sans conduire à des conséquences significatives sur les crayons voisins. Ces ruptures de crayons auraient par ailleurs des conséquences acceptables en termes de dosimétrie du personnel et de conséquences radiologiques.

Concernant les accidents des catégories 3 et 4, vous avez considéré que seuls les accidents de perte de réfrigérant primaire (APRP) sont à considérer et vous concluez que la présence de crayons initialement inétanches ne remet pas en cause la démonstration de sûreté. Ce point n'appelle pas de remarque de la part de l'ASN.

En revanche, vous faites l'hypothèse qu'en présence d'un défaut primaire sur un crayon de combustible, un équilibre de pression s'établit instantanément, en cas de transitoire, entre l'intérieur et l'extérieur du crayon, quelle que soit la cinétique de décroissance de la pression du circuit primaire associée à ce transitoire. L'ASN considère que cette hypothèse n'est pas suffisamment justifiée. En cas de différence de pression entre l'intérieur du crayon et le réfrigérant primaire lors d'un accident de rupture de tube de générateur de vapeur (RTGV), l'application de contraintes mécaniques pourrait conduire à la rupture des zones hydrurées et donc au relâchement de produits de fission et de matière fissile dans le circuit primaire. Ces phénomènes ne sont actuellement pas pris en compte dans la démonstration de sûreté puisque l'accident de RTGV est considéré comme n'entraînant pas de rupture de gaine. **L'ASN considère que les conséquences de telles ruptures doivent être étudiées, comme vous vous y engagez dans l'action 16 de votre courrier [3].**

G. Conclusion

L'examen des exigences et des critères techniques d'acceptation relatif au comportement de la première barrière de confinement, et plus généralement du combustible, pour lequel le GPR s'est réuni le 15 juin 2017, constitue une actualisation importante de la démonstration de sûreté. Cet exercice a été possible grâce à la prise en compte des résultats des essais menés dans ce domaine depuis une quarantaine d'années et au développement de nouvelles études.

Ces critères techniques d'acceptation tiennent notamment compte des nouveaux matériaux de gainage mis en place sur les différents réacteurs nucléaires d'EDF. Par ailleurs, l'ASN note l'important travail réalisé afin de tenir compte de l'état réel des combustibles dans les réacteurs (déformation des assemblages, présence de crayons inétanches). De manière générale, l'ASN considère que ce travail constitue une évolution de sûreté notable.

Demande 8 : L'ASN vous demande de définir, sous trois mois, votre échéancier de réponse aux demandes formulées ci-dessus et de prise en compte des nouveaux critères techniques d'acceptation.

L'ASN considère qu'ils devront être d'application pour les dossiers dont l'instruction n'est pas encore actuellement engagée.

Un récapitulatif des évolutions des critères et des méthodes citées dans la présente lettre figure en annexe 2.

Je vous prie d'agréer, Monsieur le Directeur, l'expression de ma considération distinguée.

Le directeur général adjoint

SIGNE

Références

- [1] Compte-rendu de la réunion de cadrage du 5 février 2013 relative à la réunion du GPR sur le thème « Critères de tenue du combustible »
- [2] Avis du groupe permanent d'experts pour les réacteurs nucléaires du 27 juin 2017 CODEP-MEA-2017-025256
- [3] Lettre EDF D305917009352 du 10 juillet 2017 : GPR critères de tenue du combustible – positions et actions
- [4] Note EDF D305915008521 ind. A du 30 mars 2016 : Analyse de la pertinence et proposition d'une limite vis-à-vis du risque de fragilisation lié à la corrosion des « gainages avancés » en fonctionnement normal et justifications associées
- [5] Note EDF D305914018385 ind. B du 2 juillet 2015 : Position sur l'absence de limite en température d'interface métal-oxyde pour les gainages avancés en transitoires de catégorie 2
- [6] Note EDF D305916002784 ind. A du 31 mars 2016 : Analyse de la pertinence du critère en température de 1482°C vis-à-vis du phénomène redouté pour les accidents concernés – note de principe
- [7] Note EDF D305916010223 ind. A du 26 octobre 2016 : Analyse de la pertinence du critère en température de 1482°C vis-à-vis du phénomène redouté pour les accidents concernés – définition d'un critère $ECR=f(T \text{ gaine})$ en complément du critère de 1482°C
- [8] Note EDF D305915016393 ind. B du 24 mars 2016 : Démonstration de la tenue mécanique des gaines au cours d'un transitoire de RIGZ : proposition d'un critère garantissant la non rupture de la gaine
- [9] Note EDF D305915007915 ind. A du 23 mars 2016 : Déformation maximale de gaine en catégorie 2 – proposition d'un critère de rupture basé sur des essais représentatifs
- [10] CODEP-DCN-2011-070565 du 26 décembre 2011 : Réacteurs électronucléaires – accident d'insertion de réactivité – domaine de découplage
- [11] Note EDF D305915003801 ind. C du 1^{er} avril 2016 : Critères RIA à puissance nulle applicables aux gainages Zircaloy-4, M5, ZIRLO et Optimized ZIRLO
- [12] Note EDF D305915004781 ind. A du 31 mars 2016 : Critères RIA à puissance nulle applicables aux combustibles MOX à gaine M5
- [13] Note EDF D305916004062 ind. A du 30 mars 2016 : Analyse thermomécanique de l'accident de RIA initié à puissance non nulle
- [14] Note EDF D305914006438 ind. B du 6 février 2015 : Prise en compte du risque de rupture par IPG-CDC lors de l'accident de R1GP (rentré d'une grappe)
- [15] Note EDF D3059150011798 ind. A du 28 décembre 2015 : GP critères – livrable 8 – justification des valeurs limites relatives au nombre de crayons ne respectant pas le critère en RFTC
- [16] Note EDF D305915006465 ind. B du 22 mars 2016 : Calcul du nombre de crayons entrant en crise d'ébullition (NCE) en situations accidentelles : définition d'un burn-up seuil garantissant l'absence de rupture des crayons en crise d'ébullition
- [17] Fiche de synthèse EDF D305916015216 du 6 décembre 2016
- [18] Note EDF D305914020614 ind. B du 4 juin 2016 : Justification du postulat de non-dispersion de matière solide pour l'évaluation du terme source des études de conséquences radiologiques pour les accidents de R1GP, rotor bloqué et éjection de grappe
- [19] Fiche de synthèse EDF D305914023693 du 10 février 2015 : Analyse de la pertinence de retenir la température centrale du combustible selon les catégories de fonctionnement considérées pour évaluer le risque de fusion du combustible
- [20] Fiche de synthèse EDF D305916013762 du 30 août 2016
- [21] Note EDF D305916004542 ind. A du 4 mai 2016 : Analyse de l'impact d'un critère de non-fusion du combustible pour les accidents de catégories 3 et 4
- [22] Guide de l'ASN n° 22 : Conception des réacteurs à eau sous pression
- [23] Lettre ASN CODEP-DCN-2016-007286 du 20 avril 2016 : Orientations génériques du réexamen périodique associé aux quatrièmes visites décennales des réacteurs de 900 MWe d'EDF (VD4 900)

- [24] Note EDF D305915009234 ind. A du 3 juillet 2015 : Calcul mécanique des distributions de lames d'eau en cœur
- [25] Fiche de synthèse EDF D305916010316 du 26 juillet 2016
- [26] Note EDF D305915007295 ind. A du 25 juin 2015 : Caractérisation de l'impact du phénomène de déformation d'assemblages sur le facteur de point chaud du cœur
- [27] Fiche de synthèse EDF D305914021931 du 19 juin 2015
- [28] Lettre ASN CODEP-DCN-2014-020988 du 1^{er} juillet 2014 : Réexamen de sûreté associé à la troisième visite décennale des réacteurs (VD3 1300), Revue de conception du système de protection intégré numérique
- [29] Lettre ASN CODEP-DCN-2015-046507 du 24 décembre 2015 : Réexamen de sûreté associé à la troisième visite décennale des réacteurs (VD3 1300), Revue de conception du système de protection intégré numérique – prise en compte de la pénalité de fléchissement
- [30] Note EDF D305916017830 du 27 octobre 2016
- [31] Note EDF D305916018473 ind. B du 12 avril 2016 : Impact de la déformation des assemblages de combustible sur le RFTC et déclinaison de la démarche présentée à la gestion GEMMES
- [32] Note EDF D305915020045 ind. A : Analyse de l'impact de la présence de crayons inétanches en réacteur sur les études concernées de la démonstration de sûreté (cat. 2 à 4)
- [33] Note EDF D305915016443 ind. B du 9 février 2016 : Justification du postulat de non-dispersion de matière solide pour l'évaluation du terme source des études de conséquences radiologiques pour les accidents de R1GP, Rotor bloqué et éjection de grappe
- [34] Fiche de synthèse EDF D305916018940 du 12 décembre 2016
- [35] Courrier EDF D305918003308 du 30/03/2018
- [36] Compte-rendu EDF-R&D AMA CR-T61-2016-232 du 25 novembre 2016 : Projet crayon combustible : résultats des calculs Europlexus pour la modélisation de l'onde RIA au sein d'un faisceau de crayons combustibles
- [37] Lettre ASN CODEP-DCN-2014-023421 du 16 juillet 2014 : Conséquences d'un accident d'insertion de réactivité en présence de crayons défectueux – corrosion du Zircaloy-4

Récapitulatif des évolutions de critères

Nota : cette annexe constitue un résumé des évolutions des critères de la démonstration de sûreté portant sur le combustible issues de l'instruction et des demandes de l'ASN. Cette annexe ne liste pas l'ensemble des critères utilisés dans la démonstration de sûreté.

Corrosion des gaines

Domaine de fonctionnement	Critère historique	Critère proposé	Accord
Fonctionnement normal M5 ou Opt. ZIRLO	Epaisseur de corrosion < 100 µm	<i>Pas de critère à vérifier</i>	Oui
Catégorie 2	Température de l'interface métal / oxyde < 425°C	<i>Pas de critère à vérifier</i>	Oui
Catégories 3 et 4	Température de la gaine < 1482°C	Limite en température et ECR	Cf. actions 1 et 2 du courrier [3]

IPG

Domaine de fonctionnement	Critère historique	Critère proposé	Accord
RIGZ	<i>Absence de critère</i>	Déformation circonférentielle plastique < 1% et [H] < 805 ppm	Cf. demande 3
Catégorie 2 (autres)	Déformation < 1 %	Déformation circonférentielle uniforme < 1 % si [H] > 250 ppm Déformation circonférentielle uniforme < 2 % si [H] < 250 ppm	Cf. demande 3
EDG < 33 GWj/t	Enthalpie < 200 cal/g	Inchangé	Oui
EDG > 33 GWj/t – UO2 – ZIRLO ou Opt. ZIRLO	EDG > 47 GWj/t : -variation d'enthalpie < 57 cal/g	-variation d'enthalpie < 80 cal/g -[H] < 1000 ppm -largeur de pulse > 30ms	Cf. demandes 1, 2 et 3
EDG > 33 GWj/t – UO2 – M5	-corrosion < 108 µm -largeur de pulse > 30ms	-variation d'enthalpie < 150 cal/g -[H] < 160 ppm	Cf. action 3 du courrier [3] et demandes 2 et 3
EDG > 33 GWj/t – MOX – M5		-variation d'enthalpie < 113 cal/g -largeur de pulse > 30ms -[H] < 160 ppm	Cf. action 4 du courrier [3] et demandes 2 et 3
R1GP	<i>Absence de critère</i>	<i>Pas de critère à vérifier</i>	Oui

Crise d'ébullition

Domaine de fonctionnement	Critère historique	Critère proposé	Accord
Catégorie 3	NCE < 5 %	Nb de crayons rompus < 5 %	Cf. demande 4
Catégorie 4	NCE < 10 %	Nb de crayons rompus < 10 %	Cf. demande 4

Fusion du combustible

Domaine de fonctionnement	Critère historique	Critère proposé	Accord
Catégorie 3 (parc installé)	<i>Absence de critère</i>	Fusion du combustible à cœur de la pastille < 10 %	Oui
Catégorie 4	Fusion du combustible < 10 %	Fusion du combustible à cœur de la pastille < 10 %	Oui

Déformation latérale des assemblages de combustible

Calcul des lames d'eau en cœur	Cf. action 8 du courrier [3]
Impact neutronique	Cf. action 9 du courrier [3]
Impact thermohydraulique	Cf. actions 10 et 11 du courrier [3]
Impact mécanique	Cf. demande 5 et action 12 du courrier [3]

Présence de crayons inétanches

Évaluation des conséquences en cas d'EDG	Cf. demande 6, actions 13, 14 et 15 du courrier [3]
Évaluation des conséquences hors-EDG	Cf. action 16 du courrier [3]