

Fontenay-aux-Roses, le 13 février 2018

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

Avis IRSN/2018-00036

Objet : Réacteurs électronucléaires - EDF - Palier N4 - État technique VD2 -
Instruction des études d'accidents associées au réexamen périodique des
réacteurs de 1450 MWe après 20 années de fonctionnement.

Réf. 1. Lettre ASN CODEP-DCN-2017-022311 du 12 juin 2017.
2. Lettre ASN CODEP-DCN-2015-000461 du 23 février 2015.
3. Avis IRSN n° 2014-00116 du 20 mars 2014.
4. Lettre ASN CODEP-DCN-2014-032737 du 24 juillet 2014.
5. Lettre ASN CODEP-DCN-2017-001478 du 12 janvier 2017.
6. Lettre ASN CODEP-DCN-2016-007286 du 20 avril 2016.
7. Lettre ASN CODEP-DCN-2016-036888 du 16 décembre 2016.

Conformément à la demande de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) citée en première référence, l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) a examiné la démonstration de sûreté relative aux conditions de fonctionnement incidentelles et accidentelles du domaine de dimensionnement des réacteurs EDF de 1450 MWe (palier N4), produite dans le cadre de la préparation de leurs deuxièmes visites décennales (VD2).

1. Contexte et contour de l'avis

Les deuxièmes visites décennales des réacteurs du palier N4 (ou VD2 N4) se tiendront à partir du début de l'année 2019. EDF doit à cette occasion effectuer une réévaluation de sûreté des installations et produire la démonstration associée, en tenant compte des objectifs fixés par l'ASN dans le courrier cité en deuxième référence, du retour d'expérience acquis sur le parc électronucléaire français et international et, plus généralement, de l'évolution des connaissances et des pratiques.

L'IRSN présente dans cet avis l'état actuel de ses conclusions sur l'acceptabilité des études menées par EDF et sur le caractère pertinent et suffisant des évolutions intellectuelles ou matérielles mises en œuvre sur les sujets suivants :

- le conservatisme des logiciels et points de consigne de l'unité de surveillance (US) et du système de protection intégré numérique (SPIN) des réacteurs de 1450 MWe ;
- les règles, méthodes, hypothèses et résultats des études des conditions de fonctionnement de dimensionnement, mises à jour à l'occasion du réexamen VD2 N4 ;
- les évaluations des conséquences radiologiques des conditions de fonctionnement de dimensionnement, également mises à jour à l'occasion du réexamen VD2 N4.

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

L'ASN souhaite de plus que l'IRSN indique sa position sur l'étude du risque de dilution hétérogène inhérente aux accidents de perte de réfrigérant primaire (APRP).

2. Revue du conservatisme de l'US, du SPIN et des incertitudes associées

Le SPIN comprend le logiciel assurant la protection « générique » du cœur du réacteur. Il calcule notamment en ligne la puissance linéique (PLIN) maximale et le rapport de flux thermique critique¹ (RFTC) minimal et déclenche l'arrêt du réacteur si ces grandeurs dépassent des seuils définis dans les études d'accidents. De plus, l'US surveille le maintien des paramètres PLIN et RFTC dans les limites du domaine de fonctionnement normal.

2.1 Conservatisme intrinsèque des logiciels de calcul du RFTC et de la PLIN

Pour diverses conditions de fonctionnement normal (catégorie 1) et incidentel (catégorie 2), EDF a comparé les valeurs de RFTC et de PLIN calculées avec les logiciels de l'US et du SPIN à celles calculées avec les mêmes logiciels que ceux utilisés dans les études du rapport de sûreté. **Concernant les conditions de catégorie 1, l'IRSN estime, au vu des résultats présentés et des hypothèses retenues, que le conservatisme intrinsèque de l'US et du SPIN N4 a été démontré.** Concernant les conditions de catégorie 2, le conservatisme est satisfaisant pour le RFTC, mais beaucoup plus limité pour la PLIN, voire insuffisant dans certaines conditions de refroidissement incontrôlé du fluide primaire. EDF a pris en compte ce constat et prévoit une pénalisation des seuils de protection par « PLIN élevée » à l'occasion des VD2 des réacteurs N4. Cette pénalisation ne nécessite pas de modification logicielle et sera bénéfique pour toutes les conditions de catégorie 2. **L'IRSN estime cette modification adaptée et suffisante.**

2.2 Revue des incertitudes adhérentes à l'utilisation des chaînes de surveillance et de protection génériques

Ce second volet de la revue de conception consiste à réexaminer les incertitudes prises en compte pour définir les seuils de surveillance et de protection en PLIN et en RFTC implantés sur les réacteurs. En effet, le SPIN et l'US évaluent de manière approchée la distribution de puissance dans le cœur et utilisent des données pré-calculées et des mesures, entachées d'incertitudes. Les seuils correspondants doivent donc être pénalisés pour couvrir l'impact cumulé des incertitudes associées à ces évaluations. À cet égard, EDF a complété son dossier au cours de l'instruction pour tenir compte des conclusions de l'analyse réalisée par l'IRSN sur le SPIN des réacteurs de 1300 MWe (voir l'avis cité en troisième référence).

Les incertitudes réexaminées par EDF concernent notamment le calcul de la répartition axiale de la puissance nucléaire sur la hauteur du cœur. À l'issue de son analyse, **l'IRSN considère qu'EDF a démontré l'acceptabilité de la prise en compte de ce poste d'incertitudes et estime satisfaisante la vérification qu'EDF s'est engagé à réaliser tel qu'énoncé dans le premier point de l'observation n° 3 en annexe 2.**

Par contre, certaines incertitudes liées à l'évaluation par le SPIN et l'US de la répartition radiale de la puissance nucléaire dans le cœur (caractérisée par le facteur d'élévation d'enthalpie $F_{\Delta H}^2$ et les facteurs radiaux de point chaud $F_{xy}(z)^3$) n'avaient pas fait l'objet d'une consolidation par EDF. Au cours de l'instruction, EDF a complété son analyse sur ce point, en particulier pour l'incertitude de mesure du $F_{\Delta H}$ par les cartes de flux analysées à l'aide du logiciel SIDERAL, et s'est engagé à produire les justifications attendues pour compléter la validation de ce logiciel, ce qui fait l'objet de l'observation n° 1 en annexe 2. **L'IRSN formule de plus l'observation n° 2 en annexe 2 concernant le logiciel SQUALE utilisé également et a priori similaire au logiciel SIDERAL.**

L'IRSN a également demandé à EDF de réexaminer l'incertitude portant sur l'évaluation du déséquilibre axial de puissance⁴ (DPAX) dans l'US et le SPIN, paramètre qui fait l'objet d'une surveillance et intervient dans la définition

¹ Rapport entre le flux thermique critique, conduisant à la crise d'ébullition, et le flux thermique à la paroi de la gaine du crayon.

² Rapport entre la puissance dans le canal le plus chaud du cœur et la moyenne de la puissance dans les canaux du cœur.

³ Rapport entre la puissance linéique maximale de la tranche axiale z du cœur et la puissance linéique moyenne de cette tranche.

⁴ Différence entre la puissance dans la moitié haute du cœur et la puissance dans la moitié basse du cœur.

des seuils de surveillance et de protection par « PLIN élevée ». À cet égard, EDF a pris l'engagement énoncé dans le deuxième point de l'observation n°3 en annexe 2, que l'IRSN estime satisfaisant. Par contre, aucune incertitude n'est évaluée pour le déséquilibre azimuthal de puissance neutronique⁵ (DPAZN), paramètre également surveillé dans l'US : en cas de dépassement d'une valeur limite, les facteurs de point chaud $F_{xy}(z)$ sont pénalisés en proportion de l'amplitude du dépassement. L'IRSN estime indispensable d'évaluer l'incertitude liée aux calculs de DPAZN réalisés pour établir la limite sur ce paramètre et formule ainsi la recommandation n°1 en annexe 1.

Enfin, suite à l'instruction menée pour le SPIN des réacteurs de 1300 MWe, EDF a engagé un programme de travail, commun aux paliers 1300 MWe et N4, au sujet des hétérogénéités de température en branche chaude⁶, tel que rappelé dans l'engagement énoncé dans le troisième point de l'observation n°3 en annexe 2. L'IRSN ne peut donc pas se prononcer, à ce jour, sur les incertitudes affectant la puissance thermique évaluée par l'US et le SPIN. EDF a par ailleurs indiqué qu'une campagne d'essais est en cours afin de caractériser expérimentalement pour le palier N4 l'« effet Callaway »⁷, phénomène constaté dans certains réacteurs de 1300 MWe. Si cet effet était constaté sur le palier N4, sa prise en compte pourrait, selon l'IRSN, nécessiter la mise en œuvre de modifications dans le cadre des VD2 des réacteurs du palier N4.

En conclusion, sous réserve des compléments attendus et de la réponse à la recommandation n°1, l'IRSN estime que la revue du conservatisme de l'US et du SPIN N4 et des incertitudes associées peut être considérée satisfaisante. Sa formalisation sera suffisante à l'issue de la mise à jour documentaire qu'EDF s'est engagé à effectuer tel qu'énoncé dans le troisième point de l'observation n°3 en annexe 2.

3. Évolution du corps d'hypothèses des études de dimensionnement des réacteurs N4 à l'état VD2

3.1 Étude de conception thermohydraulique

Cette étude dimensionne en particulier les protections contre le risque de crise d'ébullition. EDF utilise une nouvelle corrélation de flux critique (FC2002r au lieu de WRB-1), met à jour en conséquence l'algorithme de calcul simplifié permettant de simuler le SPIN dans les études d'accident et applique une nouvelle méthode dite statistique généralisée (MSG) pour le cumul des incertitudes aboutissant au dimensionnement des seuils implantés dans les réacteurs. À l'issue de son analyse, l'IRSN considère que ces modifications, consistant à reproduire des pratiques approuvées dans le cadre de l'instruction de la mise en service de l'EPR Flamanville 3, sont acceptables.

Cette étude présente également le calcul des seuils « PLIN élevée » et, en particulier, la démarche utilisée pour le cumul des incertitudes associées. Sur ce point, l'IRSN rappelle que, conformément à la demande faite par l'ASN dans le cadre des VD3 1300, l'impact potentiel du fléchissement des crayons de combustible sur le facteur de point chaud du cœur, phénomène non prévisible en l'état actuel des connaissances mais néanmoins par nature déterministe, doit être traité comme une pénalité cumulée de manière déterministe aux autres incertitudes, ce qui est d'ailleurs déjà le cas pour ce qui concerne les conséquences du fléchissement sur le RFTC.

En conclusion, à l'exception de la prise en compte de l'effet du fléchissement des crayons sur la puissance linéique, l'IRSN estime satisfaisante l'étude de conception thermohydraulique réalisée pour les VD2 N4.

⁵ Déséquilibre radial de puissance entre les quatre secteurs de cœur scrutés par les quatre détecteurs neutroniques situés à l'extérieur du cœur du réacteur.

⁶ La température dans les branches chaudes des réacteurs n'est pas homogène. L'erreur de représentativité de la mesure de cette température correspond à l'écart entre la température mesurée et la température moyenne réelle dans la branche chaude. Cette erreur, évaluée en fonctionnement normal, pourrait s'amplifier dans certaines conditions de fonctionnement incidentelles.

⁷ Ce phénomène se manifeste par des fluctuations en opposition de phase des températures mesurées en branches chaudes et peut engendrer des mouvements intempestifs du groupe de grappes régulant la température du primaire ainsi que l'apparition de l'alarme de déséquilibre azimuthal de puissance thermique (DPAZT).

3.2 Études de conception neutronique

Les études de conception neutronique fournissent les données neutroniques utilisées pour la réalisation des études d'accidents. Elles ont été intégralement reprises par EDF en utilisant la dernière version de la chaîne de calcul SCIENCE V2, utilisée pour la demande de mise en service du réacteur EPR de Flamanville 3. **Le complément apporté durant l'instruction au dossier de validation de cette chaîne de calcul, en intégrant le retour d'expérience le plus récent de l'exploitation des cœurs des réacteurs N4, n'appelle pas à ce stade de remarque significative de la part de l'IRSN, à l'exception d'un point concernant les calculs de l'efficacité du bore, point qui sera traité dans le cadre de l'instruction des essais physiques des réacteurs N4 à l'état VD2.**

Afin de réaliser les études d'accidents du RDS, il est nécessaire d'utiliser des plans de chargement théoriques du cœur qui soient cohérents avec ceux effectivement mis en œuvre en exploitation. Or, pour l'état VD2, EDF considère seulement trois plans théoriques, ce qui limite la variabilité des données neutroniques ainsi calculées. Toutefois, EDF a justifié au cours de l'instruction que les études couvrent également les caractéristiques d'un plan de chargement dit « variable » avec quatre assemblages neufs en moins, ce qui permet de tenir compte des besoins d'exploitation en termes de composition des recharges des cœurs. **L'IRSN considère que la prise en compte d'un cycle de variabilité, répondant à un besoin d'exploitation, apporte des éléments utiles à la démonstration de sûreté, ce qui fait l'objet du premier point de l'observation n°4 formulée en annexe 2.**

Les plans de chargement mis en œuvre en exploitation n'étant pas identiques aux plans théoriques, EDF vérifie à chaque rechargement en combustible que les conclusions des études de sûreté génériques présentées dans le RDS sont valides pour la campagne à venir. Ces vérifications consistent à montrer que des paramètres physiques, dits « paramètres clés », respectent des valeurs limites issues des études génériques. EDF a produit une vérification de l'exhaustivité des paramètres clés en question, qui a été complétée au cours de l'instruction. **L'IRSN considère que les justifications de cette exhaustivité méritent d'être formalisées dans les documents contribuant à la démonstration de sûreté, ce qui fait l'objet des deux autres points de l'observation n°4.**

3.3 Autres données et hypothèses d'étude

Le « corps d'hypothèses » retenu dans les études du domaine de dimensionnement est défini en cohérence avec les limites du fonctionnement normal du réacteur qui seront prescrites dans les règles générales d'exploitation des réacteurs N4 à l'état VD2. Les hypothèses retenues doivent présenter des marges suffisantes pour couvrir toute la période allant jusqu'au prochain réexamen de sûreté (VD3).

À cet égard, EDF a fait le choix de diminuer de 15 % à 10 % la valeur maximale retenue pour le taux de bouchage des tubes des générateurs de vapeur (BTGV), ce qui est contraire à la pratique habituelle mais cohérent avec le bon état actuel des GV des réacteurs N4. Le possible colmatage⁸ des GV est également pris en compte explicitement dans les études de sûreté. Par ailleurs, les anomalies connues au 1^{er} juillet 2014 et affectant les études VD1 sont résorbées dans les études VD2 N4. De plus, les modifications, matérielles ou intellectuelles, prévues à l'occasion de la VD2 N4 concernant les études du domaine de dimensionnement ont un impact bénéfique sur la sûreté de l'installation ou sa démonstration. Les modifications prises en compte dans les études sont les suivantes :

- l'installation d'un boremètre sur la ligne de décharge du circuit dédié au contrôle chimique et volumétrique du circuit primaire (boremètre RCV) pour détecter les incidents de dilution incontrôlée du circuit primaire dans les états d'arrêt du réacteur dans lesquels aucune pompe primaire n'est en service ;
- une modification visant à éliminer le risque d'enclenchement prématuré de l'aspersion au pressuriseur dans certains transitoires incidentels de chute de grappes ;

⁸ Le colmatage d'un GV désigne l'accumulation de produits de corrosion dans les trous dits « *foliés* » entourant chaque tube du GV au niveau des « plaques entretoises » assurant la tenue du faisceau tubulaire. Il provoque l'obstruction progressive de ces trous.

- un ensemble de modifications visant à optimiser la chaîne de protection conçue pour détecter les transitoires de chute de grappe(s) ;
- une modification des procédures de conduite destinée à réduire les rejets dans l'environnement en cas de rupture de tube de générateur de vapeur (RTGV) ;
- l'abaissement de la vitesse de refroidissement du circuit primaire en situation de thermosiphon (pompes primaires à l'arrêt)⁹ ;
- la possibilité de réalimenter la bache du système d'alimentation de secours des générateurs de vapeur (ASG) par le système de protection et de distribution d'eau incendie (JPI).

Enfin, les règles d'étude et critères du domaine de dimensionnement du référentiel VD1 N4 sont reconduits. En complément, le critère en puissance linéique maximale est désormais vérifié dans l'étude de chute de grappe(s) et EDF a fourni des éléments pour justifier le respect du nouveau critère défini pour les assemblages d'épuisement compris entre 33 et 47 GWj/t en cas d'éjection de grappe.

4. Études des conditions de fonctionnement de dimensionnement du palier N4

Au cours du dernier trimestre de l'année 2016, l'IRSN a réalisé une première analyse de l'ensemble des études du domaine de dimensionnement reprises pour la VD2 N4. Cette évaluation globale a pu être menée grâce au niveau de détail important des notes d'études transmises et aux échanges menés préalablement avec EDF sur le cadrage des reprises d'étude. Elle s'est également appuyée sur le retour d'expérience des instructions récemment menées dans le cadre du réexamen VD3 1300 et de la demande de mise en service de l'EPR FA3. **L'IRSN a ensuite focalisé son instruction sur les études qui présentent à la fois un enjeu de sûreté et des évolutions significatives par rapport au référentiel de la gestion de combustible ALCADÉ à l'état VD1, évolutions n'ayant pas encore été instruites dans un autre cadre ou ayant suscité des réserves. Les autres études, qui n'ont pas fait l'objet d'une instruction plus poussée, sont jugées acceptables par l'IRSN et ne sont pas abordées dans la suite de cet avis. De plus, bien qu'ayant fait l'objet d'une instruction poussée, les études de retrait incontrôlé de groupe(s) de grappes survenant en puissance (dimensionnant des seuils de protection du SPIN) et de perte totale de charge survenant à puissance nominale n'appellent, compte tenu des justifications apportées par EDF au cours de l'instruction, aucune remarque de la part de l'IRSN et ne sont donc pas non plus évoquées ci-dessous.**

4.1 Dilution homogène incontrôlée du circuit primaire survenant dans différents états du réacteur

Ces transitoires, classés en catégorie 2, se caractérisent par une baisse incontrôlée de la concentration en bore de l'eau du circuit primaire qui entraîne une augmentation du flux de neutrons dans le cœur du réacteur, se poursuivant tant que la source de dilution n'est pas isolée. Les études correspondantes ont fait l'objet de nombreuses évolutions méthodologiques destinées à corriger plusieurs anomalies déclarées par EDF. Dans les états d'arrêt normal sans pompe primaire en service, d'arrêt pour intervention et d'arrêt pour rechargement, la démonstration de sûreté repose désormais sur l'utilisation du boremètre RCV, évoqué ci-dessus, et fait actuellement l'objet d'une instruction pour l'ensemble des paliers de réacteurs d'EDF en exploitation.

En arrêt normal avec au moins une pompe en service, l'étude couvre les états d'arrêt à chaud, d'arrêt à froid et le passage de l'un à l'autre. Dans ces états, la dilution peut provoquer la divergence incontrôlée du cœur, rapidement interrompue du fait de la sollicitation de l'arrêt automatique du réacteur (AAR) par le signal de flux neutronique élevé à l'arrêt. Le même signal entraîne ensuite l'isolement automatique de la dilution en provenance du système RCV, sauf si la dilution résulte d'une fuite sur le circuit d'étanchéité des pompes primaires. Dans ce dernier cas, la

⁹ Cette modification de conduite a été retenue afin de limiter la vitesse de dépressurisation du circuit primaire et ainsi d'éviter la formation d'une bulle de vapeur sous le dôme de la cuve qui conduirait à bloquer la capacité de dépressurisation du circuit et nécessiterait le recours volontaire à l'ouverture d'une ligne de décharge du pressuriseur et au démarrage de l'injection de sécurité (conduite en « gavé-ouvert »), qui n'est pas acceptable pour les conditions de fonctionnement incidentelles.

dilution se poursuit tant que l'opérateur n'a pas isolé la fuite. **Pour le cas pénalisant correspondant à une dilution incontrôlée survenant pendant un refroidissement en cours, l'IRSN estime que la vitesse de refroidissement prescrite par les spécifications techniques d'exploitation à l'état VD2, réduite par rapport à l'état VD1, garantit des marges acceptables.**

L'étude du cas initié à pleine puissance couvre tous les états du réacteur en production et vérifie que, après l'arrêt automatique ou manuel du réacteur, la marge d'arrêt¹⁰ est suffisante et que la source de dilution est isolée suffisamment tôt pour éviter un retour en puissance du réacteur. L'étude s'appuie sur le calculateur de marge d'arrêt implanté dans le SPIN N4 et sur le dimensionnement des seuils implantés dans l'automatisme anti-dilution générant l'alarme « dilution intempestive » et l'isolement automatique du système RCV. Les valeurs retenues par EDF pour ces seuils en VD2 N4 sont soit identiques à celles retenues en VD1, soit plus restrictives et, à l'issue de son analyse, **l'IRSN estime satisfaisant le dimensionnement de l'automatisme de protection anti-dilution, sous réserve des conclusions de l'étude supplémentaire identifiée ci-dessous.**

Conformément aux règles des études de dimensionnement, une défaillance aggravante est postulée dans l'étude. Elle porte sur le blocage de la grappe de commande la plus anti-réactive en position haute pendant l'AAR. **L'IRSN estime qu'une défaillance d'une vanne du groupe de contournement de la turbine vers le condenseur (GCT-c) ou vers l'atmosphère (GCT-a) lors de son ouverture rapide suite à l'AAR ou ultérieurement, et conduisant au maintien en position ouverte de la vanne et *in fine* au retour en puissance du réacteur, est possible, ce qui a été confirmé par le retour d'expérience issu d'évènements significatifs pour la sûreté. À cet égard, l'IRSN formule la recommandation n°2 en annexe 1 et l'observation n°5 en annexe 2.**

4.2 Chute d'une ou plusieurs grappes de contrôle survenant en puissance (CDG)

L'étude de CDG sans manque de tension externe (MDTE), classée en catégorie 2, a pour objectif de vérifier le dimensionnement de la chaîne de protection dédiée à la détection de cet incident et le dimensionnement des seuils de surveillance du RFTC et de la PLIN, pour les cas non détectés. La reprise de l'étude à l'état VD2 doit également justifier le caractère suffisant des modifications, évoquées plus haut, prévues pour corriger les anomalies affectant l'étude actuelle et améliorer la sûreté des réacteurs N4 vis-à-vis de cet incident. **L'IRSN estime à l'issue de son analyse que ces modifications sont suffisantes et que l'étude de CDG sans MDTE est acceptable.**

L'étude de CDG avec cumul d'un MDTE figure dans le domaine de dimensionnement des réacteurs N4, conformément aux règles d'études définies à l'origine de ce palier pour les initiateurs classés en catégorie 2 ou 3. Ces transitoires sont considérés comme appartenant à la catégorie 4, la notion de cumul du MDTE résultant de la prise en compte d'un séisme en tant qu'initiateur d'un accident et de défaillances induites sur les matériels non classés au séisme. Le risque d'endommagement du combustible pendant le transitoire accidentel peut alors être amplifié par la diminution du débit traversant le cœur, suite à la perte des pompes primaires au moment du MDTE, et éventuellement par l'échauffement supplémentaire du fluide primaire en cas de perte du système d'alimentation normale en eau du circuit secondaire (ARE) avant le MDTE. L'étude transmise postule la perte de l'ARE dès l'instant initial, ce qui provoque la diminution du niveau d'eau dans les GV jusqu'à l'atteinte du seuil sollicitant le signal d'AAR, au moment duquel la perte des pompes primaires est postulée. Le cas qui serait obtenu en maintenant provisoirement le fonctionnement de l'ARE et de la régulation de la température primaire (comme dans l'étude sans MDTE) et en appliquant le MDTE à un instant différé par rapport à l'initiateur, mais restant compatible avec la durée des sollicitations sismiques, n'est pas étudié alors qu'il pourrait être plus pénalisant. Selon EDF, l'analyse de ce transitoire ne présenterait pas d'enjeu de sûreté pour les réacteurs N4 à l'état VD2, compte tenu de l'implantation d'un signal de protection en cas de détection d'un séisme qui solliciterait l'AAR aux tous premiers instants du

¹⁰ Écart à la criticité après la chute des grappes de contrôle dans le cœur, suite à l'arrêt automatique ou manuel du réacteur.

transitoire. Selon l'IRSN, cet argument ne peut cependant pas être retenu car ce nouveau signal, bien que bénéfique pour la sûreté, ne remplit pas les exigences de classement des matériels requises pour les conditions de fonctionnement du domaine de dimensionnement. **Ainsi, l'IRSN estime que les éléments apportés par EDF ne sont pas suffisants pour exclure de la démonstration de sûreté l'étude des cas, mentionnés ci-dessus, de chute de grappe(s) avec cumul différé du MDTE, qui avaient d'ailleurs été analysés par EDF à l'origine du palier N4 et s'étaient avérés être les plus pénalisants, ce qui le conduit à formuler la recommandation n°3 en annexe 1.**

4.3 Retrait incontrôlé d'une grappe survenant en puissance (R1GP)

L'étude de R1GP, classée en catégorie 3, a pour objectif de vérifier le dimensionnement des moyens de protection spécifiquement conçus dans la chaîne de protection par « bas RFTC » du SPIN afin d'anticiper la sollicitation de l'AAR pour ce type d'accident induisant un échauffement dissymétrique du fluide traversant le cœur. L'augmentation dissymétrique des températures mesurées au niveau des quatre branches chaudes du circuit primaire provoque, lorsque deux mesures dépassent un seuil noté TOUTS, l'augmentation du seuil « bas RFTC » d'un facteur multiplicatif noté KAU. Pour la VD2, EDF prévoit d'augmenter le KAU et de reconduire la valeur du seuil TOUTS, ce qui n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN. Cependant, le cas de retrait de grappe le plus pénalisant dans l'étude VD2 N4 conduit à un déclenchement du seuil TOUTS tardif par rapport à l'instant d'entrée en crise d'ébullition au point chaud du cœur. Les conséquences d'un maintien prolongé de la crise d'ébullition ne sont pas couvertes par les critères de sûreté retenus en VD2 N4 et ce maintien peut provoquer une fusion partielle du combustible. **À cet égard, EDF a fourni au cours de l'instruction une étude, réalisée à l'aide d'une nouvelle méthode s'appuyant sur des calculs de neutronique en 3D (à l'état de l'art), qui apporte la raisonnable assurance de l'absence de crise d'ébullition prolongée au cours du R1GP et qui n'appelle pas, à ce stade, de remarque de l'IRSN.** De plus, pour mettre à jour sa démonstration dans le cadre du référentiel en vigueur, EDF complètera l'étude présentée dans le rapport de sûreté VD2 N4, d'ici au milieu de l'année 2018, en évaluant les conséquences du maintien de la gaine à haute température et en considérant une fraction de combustible fondu dans l'évaluation des conséquences radiologiques de l'accident.

4.4 Rupture d'une tuyauterie vapeur survenant en puissance

L'initiateur considéré est une brèche plus ou moins importante sur le circuit secondaire principal, classée en catégorie 3 ou 4. L'ouverture de la brèche provoque une augmentation brutale du débit vapeur qui induit un refroidissement du réfrigérant primaire et une augmentation de la puissance nucléaire par effet modérateur, amplifiée par l'extraction des grappes commandée par la régulation de la température primaire lorsqu'elle est activée. L'AAR peut être sollicité par « puissance thermique élevée » ou par « basse pression vapeur avancée », selon la taille de brèche. **À l'issue de son analyse, l'IRSN n'a pas de remarque à formuler sur l'étude de rupture de tuyauterie vapeur (RTV) à pleine puissance sans cumul du MDTE.** Par contre, de manière similaire au cas de l'étude de CDG évoqué plus haut, l'IRSN considère que la démonstration de sûreté est incomplète pour l'étude avec cumul du MDTE. Ceci concerne tout d'abord les brèches situées à l'intérieur de l'enceinte du réacteur, en cas de MDTE et de perte des pompes primaires à l'instant initial ou à un instant différé avant le signal d'AAR éventuellement sollicité (selon la taille de la brèche), car, à ce jour, aucune des deux chaînes de protection sollicitées en cas de diminution du débit primaire n'est qualifiée aux conditions d'ambiance accidentelle dans l'enceinte du réacteur. De plus, EDF n'étudie pas l'effet du cumul du MDTE pour les petites brèches ne sollicitant pas d'AAR à court terme. Or, à l'origine du palier N4, une étude évaluait les conséquences, potentiellement pénalisantes, d'un MDTE survenant à un palier de puissance supérieur à 100 %Pn, pour toutes les tailles de brèches, sollicitant ou non un AAR. **Ainsi, sur la base d'une position similaire à celle prise pour l'étude de CDG, l'IRSN estime nécessaire qu'EDF complète l'étude de RTV en puissance avec MDTE conformément à la recommandation n°4 en annexe 1.**

4.5 Éjection d'une grappe de régulation dans l'état réacteur en production (EDG)

L'étude d'EDG est conforme à la méthode d'étude 3D rénovée approuvée par l'ASN, a été réalisée avec des provisions conséquentes sur les données neutroniques, et présente des marges par rapport aux critères de sûreté à vérifier. Par ailleurs, afin de combler une lacune de la démonstration, EDF a apporté une justification de la tenue mécanique des gaines des assemblages de combustible dont les taux de combustion en valeur moyenne assemblage sont compris entre 33 et 47 GWj/tU. Les critères utilisés, pour tous les taux de combustion considérés, n'étant cependant valables que pour des éjections de grappe initiées à puissance nulle, EDF doit encore démontrer que les cas initiés à puissance non nulle sont couverts par ceux initiés à puissance nulle et intégrer ces compléments de démonstration dans le rapport de sûreté des réacteurs N4 à l'état VD2 à l'échéance de mi-2019. Enfin, conformément à une demande antérieure, EDF a fourni une étude complémentaire concernant les transitoires qui pourraient ne pas solliciter l'AAR par « taux élevé d'augmentation de flux neutronique ». Cette étude, transmise en décembre 2017, conduit d'ores et déjà EDF à faire évoluer ce seuil de protection dans le référentiel VD2 N4, ainsi que le seuil « basse pression au pressuriseur » (sollicité pour les cas induisant une brèche au niveau du couvercle de cuve). **L'IRSN estime donc satisfaisant le dimensionnement des réacteurs N4 à l'état VD2 vis-à-vis de l'accident d'éjection d'une grappe de régulation, sous réserve de l'instruction à venir concernant le complément de démonstration dédié aux cas ne sollicitant pas les protections neutroniques, qui devra figurer dans le rapport de sûreté compte tenu de l'impact déjà constaté sur le réglage de certains seuils de protection.**

4.6 Rupture d'un ou deux tubes de générateur de vapeur (RTGV3 et RTGV4)

Les études de RTGV3 (rupture d'un tube, catégorie 3) et de RTGV4 (rupture de deux tubes, catégorie 4) ont notamment pour objectif de calculer les rejets (en liquide et en vapeur) dans l'environnement. Pour abaisser ces rejets, EDF a prévu, à l'occasion de la VD2 N4, une modification de la procédure de conduite mise en œuvre, qui consiste à prolonger le refroidissement rapide par les GV sains pour atteindre plus rapidement le critère d'arrêt de l'injection de sécurité à moyenne pression, ce qui limite le remplissage du GV affecté avec du fluide primaire et réduit donc le risque de débordement en eau liquide et les rejets radioactifs. Ces études vérifient par ailleurs la capacité à rallier l'état sûr en préservant une marge de sous-criticité suffisante dans le cœur du réacteur et en évacuant convenablement la puissance résiduelle.

Plusieurs hypothèses retenues pour la VD2 N4 ont fait l'objet d'échanges avec EDF, qui l'ont notamment conduit à réaliser des études de sensibilité pour la RTGV3. **À l'issue de ces compléments, l'IRSN estime acceptables les hypothèses retenues pour évaluer les rejets radioactifs dans l'étude de RTGV3. En revanche, EDF a déclaré que l'étude de RTGV4 fait l'objet d'anomalies et a décidé de reprendre l'étude comme indiqué dans l'observation n°6 en annexe 2. L'IRSN estime cet engagement satisfaisant, ainsi que l'échéance associée.**

En cas de RTGV, la gaine des crayons de combustible est la seule barrière de confinement entre le combustible et l'environnement : son intégrité doit être démontrée. Or, entre l'instant initial de l'accident et la fin de l'intervention de l'AAR, le risque d'endommagement du combustible en cas de crise d'ébullition due à la dépressurisation du circuit primaire n'est pas étudié. À cet égard, EDF considère que la taille de brèche équivalente à une RTGV4 (deux tubes) est couverte par la nouvelle démarche développée pour les brèches de taille intermédiaire sur le circuit primaire (APRP-BI) suite à l'instruction menée pour le réacteur EPR de Flamanville 3. **EDF a donc pris l'engagement cité dans l'observation n°7 en annexe 2 pour compléter sa démonstration. L'IRSN estime acceptable cet engagement et l'échéance associée.**

La sous-criticité du cœur doit être assurée pendant un transitoire de RTGV. Cette démonstration n'étant pas apportée dans l'étude de RTGV3 (sans MDTE), EDF a fourni en fin d'instruction un complément d'étude démontrant le respect d'une marge suffisante. Pour l'étude de RTGV4 avec cumul du MDTE, EDF a confirmé l'analyse de l'IRSN

selon laquelle la mise en œuvre de la conduite en « gavé-ouvert »¹¹ pourrait induire la rétro-vidange d'une masse conséquente de fluide secondaire (sans bore) dans le circuit primaire, induisant une diminution de la concentration en bore dans le cœur. À cet égard, EDF a pris l'engagement cité dans l'observation n°8 en annexe 2. L'IRSN considère que la démonstration complète de la maîtrise de la sous-criticité en situation de RTGV de catégorie 3 et de catégorie 4 devra figurer dans le rapport de sûreté des réacteurs N4 à l'état VD2.

Concernant la justification de l'évacuation de la puissance résiduelle à long terme, l'étude de RTGV3 évalue la quantité d'eau à apporter par le circuit d'alimentation de secours des GV (système ASG) jusqu'à l'atteinte des conditions thermohydrauliques permettant la connexion du circuit de refroidissement du réacteur à l'arrêt (RRA). Ce calcul est cependant réalisé à l'aide d'une méthode qui fait l'objet de deux anomalies déclarées par EDF durant l'instruction. À ce stade, la démonstration de l'évacuation de la puissance résiduelle à long terme en situation de RTGV de catégorie 3 n'est donc pas apportée et des éléments d'appréciation supplémentaires sont attendus de la part d'EDF d'ici à fin février 2018. Dans l'étude de RTGV de catégorie 4, la phase d'attente sans pompe primaire en service (en raison du cumul du MDTE) peut conduire à la vidange de la bêche ASG (en l'absence de moyen de réalimentation), puis à l'atteinte des critères d'indisponibilité des GV sains et au recours à une conduite du réacteur en « gavé ouvert », autorisée pour les conditions de dimensionnement de catégorie 4 dans les règles d'étude du palier N4.

4.7 Accident de perte de réfrigérant primaire causé par une brèche de taille intermédiaire ou une grosse brèche

Les études d'APRP de catégorie 4 vérifient que le système d'injection de sécurité et les limites du fonctionnement normal du réacteur en termes de distribution de puissance dans le cœur permettent de garantir la capacité de refroidir les assemblages de combustible à moyen et long termes malgré les conséquences de l'APRP. Selon la taille de la brèche, les phénomènes physiques induits varient, ce qui motive des modélisations différentes de l'accident.

L'étude d'APRP grosse brèche (GB) doublement débattue (2A) transmise pour la VD2 N4 est conforme au référentiel APRP en vigueur au moment de sa réalisation, EDF ayant indiqué ne pas pouvoir anticiper le déploiement du nouveau référentiel APRP approuvé par l'ASN (cf. lettre citée en quatrième référence). Cependant, la température maximale de gaine évaluée dans cette étude est telle que les phénomènes relatifs au combustible connus et pris en compte dans le nouveau référentiel APRP seraient activés, mais ne sont pas pris en compte dans le référentiel utilisé. **L'étude d'APRP grosse brèche n'est ainsi pas démonstrative compte tenu des connaissances actuelles. Cependant, le nouveau référentiel APRP ne considère plus les brèches doublement débattues (2A) dans le domaine de dimensionnement. Il a donc été décidé de ne pas instruire plus avant l'étude d'APRP-2A.**

L'étude des brèches de taille intermédiaire (APRP-BI), en revanche, a fait l'objet d'une l'attention particulière et l'IRSN a mené son analyse au regard des connaissances actuelles. La première version de l'étude d'APRP-BI réalisée pour la VD2 N4 par EDF avec la Méthode déterministe réaliste (MDR) en vigueur conduisait à des températures maximales de gaines inférieures à 700 °C permettant d'écarter l'activation des phénomènes connus liés au combustible. Toutefois, compte tenu des réserves exprimées par l'IRSN sur les hypothèses retenues, notamment pour la puissance résiduelle du cœur, EDF a mis à jour l'étude au cours de l'instruction. La nouvelle version de l'étude conduit à une température maximale de gaine proche de 1000 °C. Compte tenu de ce niveau de température atteint, de l'absence de prise en compte des phénomènes relatifs au combustible attendus à ce niveau de température et de la sensibilité marquée de ce résultat à l'hypothèse de puissance résiduelle utilisée, l'IRSN considère que la démonstration relative à la capacité de refroidissement du cœur en APRP BI en VD2 N4 n'est

¹¹ La conduite en « gavé-ouvert » consiste à mettre en service le système d'injection de sécurité s'il ne s'est pas déjà déclenché, puis à procéder à une ouverture contrôlée des lignes de décharge du pressuriseur afin de dépressuriser le circuit primaire et d'évacuer la puissance résiduelle produite par le cœur du réacteur.

pas acquise à ce jour. À cet égard, EDF doit, conformément à la demande D2 formulée par l'ASN dans le courrier cité en cinquième référence, réaliser une étude utilisant la nouvelle méthode CathSBI d'étude des APRP-BI développée suite à la définition du nouveau référentiel APRP, en veillant à tenir compte des demandes de l'ASN sur cette méthode de manière à assurer le conservatisme des résultats.

Enfin, l'IRSN a analysé l'étude transmise par EDF dans le cadre de la VD2 N4 pour évaluer le risque associé à la dilution hétérogène inhérente à l'APRP¹². Cette étude est réalisée en tant qu'étude justificative particulière, c'est-à-dire en relaxant les règles d'étude par rapport à celles appliquées aux conditions de fonctionnement du domaine de dimensionnement, car ce risque n'était pas identifié à l'origine du palier N4. Pourtant, cette dilution hétérogène est une conséquence possible de l'APRP, au même titre que le dénoyage du cœur ou la sollicitation de l'enceinte en pression et en température, qui sont étudiés depuis la conception des réacteurs en appliquant les règles d'études du domaine de dimensionnement. L'étude de la dilution hétérogène inhérente est d'ailleurs réalisée selon les règles du dimensionnement sur le réacteur EPR de Flamanville 3 et devra l'être également sur le palier 900 MWe à l'issue du réexamen VD4, conformément à demande SUR2 formulée par l'ASN dans le courrier cité en sixième référence. De même, l'IRSN considère qu'EDF devra étudier le risque de dilution hétérogène inhérente à l'APRP en appliquant les règles d'étude des conditions de fonctionnement de dimensionnement pour les réacteurs N4.

4.8 Rupture d'une tuyauterie vapeur de catégorie 4 étudiée à puissance nulle (RTV4)

L'étude de RTV4 initiée à puissance nulle analyse les conséquences d'une rupture guillotine doublement débattue (RTV 2A) de la partie du circuit secondaire située à l'intérieure de l'enceinte de confinement du réacteur, dans la phase de l'accident qui se déroule après l'intervention de l'AAR.

L'énergie importante libérée par la brèche 2A entraîne une augmentation rapide de la pression dans l'enceinte et consécutivement l'arrêt automatique des GMPP (AA-GMPP). Il est apparu au cours de l'instruction qu'une taille de brèche inférieure à la 2A pourrait être plus pénalisante. Ceci a conduit EDF à prévoir une mise à jour de l'étude de RTV4 à l'état VD2 N4, dont la transmission est prévue à l'échéance d'avril 2018. Cette reprise d'étude ne devrait cependant pas mettre en cause les conclusions de l'étude actuelle, compte tenu des marges aux critères constatées.

La démonstration relative à la RTV4 est par ailleurs complétée par l'étude de la suite du transitoire qui se déroule pendant la phase moyen terme après l'AAR et l'AA-GMPP. Cette étude reposant sur la méthode disponible au moment de sa réalisation, certaines demandes relatives à cette méthode précisées en annexe 2 du courrier ASN cité en septième référence n'ont pas pu être prises en compte. Plusieurs d'entre elles seront traitées par EDF dans un cadre générique à tous ses réacteurs ; d'autres ont donné lieu à des compléments de justification que l'IRSN estime acceptables ; enfin, les dernières justifications sont attendues d'ici à juin 2018. De plus, l'étude actuelle ne couvre pas le cas d'un réacteur en prolongation de cycle, identifié par l'IRSN comme pénalisant. La démonstration de sûreté pendant la phase à moyen terme de l'étude de RTV4 après l'arrêt automatique des pompes primaires doit donc encore être complétée par EDF, qui a pris les engagements cités dans l'observation n°9 en annexe 2.

4.9 Rupture d'une tuyauterie d'eau alimentaire (RTE)

L'étude de RTE, classée en catégorie 4, analyse les conséquences d'une rupture de la tuyauterie d'eau alimentaire située en aval du clapet anti-retour. La brèche provoque un refroidissement du circuit primaire par vidange du GV affecté, qui cesse lorsque ce dernier est vide. Ensuite, la réduction de la capacité d'évacuation de la puissance par

¹² Un APRP peut conduire, après l'arrêt des pompes primaires et suite à l'arrêt de la circulation naturelle, à la formation et à l'accumulation dans certaines parties du circuit primaire d'eau faiblement borée, par condensation de la vapeur dans les tubes des générateurs de vapeur. Or, en cas d'APRP, les procédures accidentelles demandent à l'opérateur d'initier un refroidissement par le circuit secondaire, qui peut amener à une reprise de la circulation naturelle dans le circuit primaire. Ceci peut conduire à l'envoi de ces bouchons d'eau faiblement borée vers le cœur et induire un retour incontrôlé en puissance du cœur du réacteur.

le circuit secondaire entraîne un échauffement du circuit primaire, en particulier dans la boucle reliée au GV affecté. Le risque de crise d'ébullition jusqu'à l'intervention efficace de l'AAR n'est cependant pas étudié explicitement car il est réputé couvert par l'étude de RTV en puissance. Ceci a été vérifié par EDF à la demande de l'IRSN au cours de l'instruction.

Après l'intervention de l'AAR, la mise en service automatique du système d'injection de secours (RIS) assure l'absence de découverture du cœur pour toutes les tailles de brèche étudiées, ce qui garantit l'intégrité du combustible. Un état d'arrêt sûr du réacteur est ensuite atteint grâce aux actions des opérateurs. **Pour les plus petites tailles de brèches, qui pourraient être classées en catégorie 3, l'IRSN estime qu'EDF aurait pu améliorer sa démonstration en vérifiant l'absence de nécessité de mise en œuvre d'une conduite en « gavé-ouvert », comme c'est le cas dans les études effectivement classées en catégorie 3.** Néanmoins, la modification prévue sur les réacteurs N4 dans le cadre de la VD2 en vue d'utiliser le système de protection et de distribution d'eau d'incendie (JPI) pour réalimenter la bêche du système ASG pourrait être valorisée en catégorie 3.

4.10 Études dédiées à la vérification de la capacité à conduire le réacteur jusqu'à l'état sûr (phases C)

Les études portant sur la phase C des conditions de fonctionnement de dimensionnement visent à démontrer que les opérateurs pourront amener le réacteur dans un état d'arrêt sûr.

Concernant l'évacuation de la puissance résiduelle produite par le cœur du réacteur après l'AAR, le critère vérifié pour les conditions de catégorie 2 (sans MDTE) et la plupart des conditions de catégorie 3 ou 4 (sans MDTE) porte sur le maintien de la disponibilité du système ASG jusqu'à l'atteinte des conditions permettant la connexion du circuit de refroidissement du réacteur à l'arrêt (RRA), dont la mise en service permet d'évacuer la puissance résiduelle sur le long terme. En postulant un aggravant sur le système de réalimentation de la bêche ASG, la mise en service du RRA avant la vidange de la bêche ASG évite la mise en œuvre du « gavé-ouvert ».

EDF a déclaré durant l'instruction une anomalie d'étude affectant les calculs de consommation d'eau provenant du système ASG et concernant notamment les études de perte de l'eau alimentaire normale, d'ouverture intempestive d'une soupape secondaire et de rupture de tuyauterie vapeur, et une anomalie relative à l'absence d'isolement automatique du circuit de purge des GV. De plus, EDF n'a pas transmis, à ce jour, de démonstration pour la phase C de l'étude de RTV initiée en puissance. L'achèvement de la caractérisation de ces anomalies par EDF pour le palier N4, d'abord prévu en décembre 2017, a été reporté à février 2018. **Dans l'attente, l'IRSN ne peut pas se prononcer, pour les études concernées, sur la capacité à conduire le réacteur jusqu'à l'état d'arrêt sûr sans recourir à la réalimentation de la bêche ASG ou à la conduite en « gavé-ouvert ».**

Néanmoins, comme évoqué pour l'étude de RTE, une modification prévue à l'occasion de la VD2 N4 permettra d'utiliser le système JPI comme moyen supplémentaire de réalimentation de la bêche ASG, valorisable pour les études classées en catégorie 2 ou 3, et d'éviter ainsi le recours au « gavé-ouvert ». Cette modification, valorisée dans l'étude de la phase C de l'incident de perte totale des alimentations électriques externes (PTAEE), est en cours d'instruction dans le cadre de l'affaire EDF référencée « PNPP4864 ». **Les études de PTAEE étant toutefois affectées par les deux anomalies mentionnées ci-dessus, la démonstration de l'évacuation de la puissance résiduelle à long terme en situation de PTAEE n'est pas encore apportée dans le référentiel VD2 N4 et l'analyse de ce point doit se poursuivre dans le cadre de l'instruction du dossier PNPP4864.**

Concernant la maîtrise de la sous-criticité du cœur à long terme, les accidents de RTE ou de RTV dans l'enceinte entraîneraient un déversement, dans les puisards, d'eau non borée provenant du circuit secondaire. Or, l'atteinte de l'état sûr pour ces accidents nécessite la mise en œuvre du « gavé-ouvert » qui conduit, à terme, au passage en recirculation sur les puisards. **EDF a indiqué au cours de l'instruction que les apports de bore dans les puisards par l'injection de sécurité (IS) et par le système d'aspersion de l'enceinte (EAS) devraient permettre de**

maintenir le cœur sous-critique et s'est engagé à le démontrer comme énoncé dans l'observation n° 10 en annexe 2, ce que l'IRSN considère satisfaisant.

4.11 Vérification des critères associés aux conditions accidentelles de pression et de température dans l'enceinte

Les accidents de dimensionnement pénalisants vis-à-vis des conditions d'ambiance dans l'enceinte sont les accidents d'APRP et de RTV classés en catégorie 4. Les études correspondantes ont été mises à jour par EDF afin de prendre en compte les évolutions d'hypothèses et les modifications matérielles réalisées en VD2.

Les évaluations de la pression maximale atteinte dans l'enceinte pour ces transitoires n'appellent pas de remarque de la part de l'IRSN. Concernant la température maximale des puisards au passage en recirculation, la reprise d'étude réalisée permet de restaurer des marges par rapport l'étude à l'état VD1 et EDF a justifié le caractère pénalisant des hypothèses retenues. Concernant la vérification du « profil K1 », permettant de s'assurer du respect des conditions de qualification des matériels nécessaires en situation accidentelle dans l'enceinte, la démonstration initiale d'EDF considère qu'un film d'eau liquide se déposera sur l'ensemble des matériels concernés et persistera pendant tout le transitoire. Or, l'IRSN estime que la persistance de ce film n'est pas assurée en cas de surchauffe de l'atmosphère de l'enceinte, même après le démarrage du système d'aspersion de l'enceinte. Pour répondre à cette réserve, EDF a réalisé une étude, comparable à celle transmise dans le cadre de l'instruction du réexamen VD3 des réacteurs de 1300 MWe, qui montre que la température de surface des matériels concernés ne dépasse pas le « profil K1 ». **L'IRSN estime que cette étude apporte des éléments nécessaires à la démonstration de sûreté et formule en conséquence l'observation n° 11 en annexe 2.**

5. Évaluations des conséquences radiologiques des accidents du domaine de dimensionnement

Dans la lettre citée en deuxième référence relative à l'orientation du réexamen de sûreté VD2 N4, l'ASN a demandé à EDF de « *prendre comme référence, pour rechercher des améliorations associées au réexamen de sûreté VD2 N4, l'objectif radiologique qualitatif défini pour les réacteurs de troisième génération pour les accidents sans fusion du cœur, qui est l'absence de nécessité de mise en œuvre de mesures de protection des populations [autres que des mesures de restriction de consommation d'aliments]* ».

L'IRSN a tout d'abord examiné la méthode et les hypothèses appliquées pour calculer les rejets hors de l'installation dans le RDS du palier N4 à l'édition VD2 pour le domaine de dimensionnement. **L'IRSN considère que la méthode et les hypothèses retenues par EDF sont globalement satisfaisantes, à l'exception des hypothèses de taux de renouvellement d'air retenues, lorsque la ventilation est en service, pour les accidents de perte de réfrigérant primaire de catégorie 4 et d'éjection d'une grappe de régulation, ce qui conduit l'IRSN à formuler la recommandation n° 5 en annexe 1.** De plus, l'IRSN estime que **les hypothèses de taux de renouvellement d'air retenues, lorsque la ventilation est en service, pour la rupture du réservoir du circuit de contrôle volumétrique et chimique du circuit primaire (RCV) et la rupture d'une bache du système de traitement des effluents gazeux, devraient faire l'objet d'une étude de sensibilité, comme indiqué dans l'observation n° 12 en annexe 2.**

Pour ce qui concerne l'évaluation des conséquences radiologiques à partir des rejets hors de l'installation, l'IRSN rappelle que certains besoins d'améliorations méthodologiques ont été identifiés pour tous les paliers de réacteurs dont la prise en compte par EDF est engagée pour les futurs réexamens de sûreté.

Pour ce qui concerne les résultats des évaluations des conséquences radiologiques, l'IRSN note que, parmi toutes les conditions du domaine de dimensionnement, l'accident de RTGV4 est le seul à l'état VD2 N4 qui conduise à un dépassement de la dose équivalente à la thyroïde retenue en situation d'urgence radiologique pour la prise de comprimés d'iode stable. De plus, l'IRSN rappelle que l'étude RTGV4 fait l'objet d'anomalies et doit être reprise par EDF, comme indiqué dans l'observation n° 6 en annexe 2.

Un abaissement des seuils portant sur la radioactivité du fluide primaire dans les spécifications radiochimiques du palier N4 permettrait à EDF, pour l'accident de RTGV4, de s'approcher davantage de l'objectif pris comme référence par l'ASN dans sa demande. La décision prise par EDF de ne pas abaisser ces seuils à l'occasion du réexamen VD2 sera instruite prochainement, dans le cadre d'un avis relatif aux spécifications radiochimiques, relatif à tous les paliers de réacteurs. **En tout état de cause, l'IRSN considère que la réponse apportée par EDF à la demande de l'ASN rappelée ci-dessus n'est pas suffisamment ambitieuse et se positionnera ultérieurement sur l'atteinte des objectifs du réexamen VD2 N4 au sujet de la réduction des conséquences radiologiques de l'accident de RTGV de catégorie 4.**

Les résultats des évaluations par EDF des conséquences radiologiques de l'APRP4 ne montrent pas de nécessité de mise en œuvre de mesures de protection des populations. Toutefois, la dose équivalente à la thyroïde « enfant » à court terme à 500 m calculée est très proche du niveau d'intervention en situation d'urgence radiologique associé à l'administration d'iode stable. **L'IRSN souligne que la prise en compte de la recommandation n°5 pourrait conduire EDF à réévaluer ces résultats à la hausse et rappelle les réserves mentionnées supra concernant la démonstration de la capacité de refroidissement du cœur en situation d'APRP.**

Conclusion

Sous réserve des compléments attendus et de la prise en compte de la recommandation n°1, l'IRSN estime que la revue du conservatisme de l'US et du SPIN et des incertitudes associées, menée en préparation des VD2 N4, et ayant conduit à des modifications matérielles, est satisfaisante.

L'étude de conception thermohydraulique, dimensionnant différents seuils de protection et de surveillance du réacteur, est acceptable. Une grande partie des études de dimensionnement VD2 N4 n'appellent pas de remarque de la part de l'IRSN et EDF a pris, lorsque nécessaire, des engagements pour compléter ou corriger sa démonstration de sûreté. Toutefois, l'IRSN estime qu'une étude supplémentaire de dilution est nécessaire pour évaluer l'effet d'un aggravant plus pénalisant que celui retenu dans l'étude fournie (recommandation n°2) et que les études de chute de grappe(s) et de rupture de tuyauterie vapeur en puissance doivent être complétées en considérant la perte des pompes primaires à des instants, compatibles avec la fenêtre de temps des sollicitations sismiques à l'origine du manque de tension externe, mais plus pénalisants que ceux retenus (recommandations n°3 et 4). Enfin, compte tenu des connaissances actuelles, EDF doit encore conforter la démonstration de la capacité de refroidissement du cœur en situation d'accident de brèche de taille intermédiaire sur le circuit primaire.

Enfin, pour ce qui concerne les évaluations des conséquences radiologiques des conditions de fonctionnement de dimensionnement, les hypothèses retenues pour évaluer les rejets sont globalement acceptables à l'exception de l'hypothèse de renouvellement d'air dans certains locaux en cas d'éjection de grappe ou d'accident de perte de réfrigérant primaire causé par une brèche de taille intermédiaire ou une grosse brèche (recommandation n°5). La suffisance des modifications mise en œuvre en VD2 N4 vis-à-vis de l'accident de rupture de deux tubes d'un générateur de vapeur n'est à ce jour pas établie. À cet égard, les spécifications radiochimiques font l'objet d'une instruction sur l'ensemble des paliers de réacteurs électronucléaires d'EDF.

Pour le directeur général et par délégation,

Frédérique PICHEREAU

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté

Annexe 1 à l'Avis IRSN/2018-00036 du 13 février 2018

Recommandations

Recommandation n° 1 :

L'IRSN recommande que, dans le cadre de la mise à jour de son dossier de revue des incertitudes « adhérentes » à l'utilisation de l'unité de surveillance et du système de protection intégré numérique des réacteurs N4 prévue d'ici à fin 2019, EDF détermine l'incertitude globale associée à la valeur de déséquilibre azimutal de puissance considérée comme limite du domaine de fonctionnement normal dans les spécifications techniques d'exploitation et dont le franchissement conduit de façon automatique à appliquer une majoration des facteurs radiaux de point chaud $F_{xy}(z)$ dans les chaînes de surveillance « puissance linéique élevée » et « bas RFTC » de l'unité de surveillance des réacteurs N4.

Recommandation n° 2 :

Dans le cadre du réexamen VD2 N4, l'IRSN recommande qu'EDF étudie, en appliquant les hypothèses d'étude du domaine de dimensionnement, les conséquences sur l'intégrité des gaines des crayons de combustible des transitoires de refroidissement intempestif qui pourraient être induits par un refus de fermeture de la vanne réglante d'une ligne de contournement de la turbine (GCT-a ou GCT-c) suite à sa sollicitation après un arrêt automatique du réacteur provoqué par un incident de dilution homogène incontrôlée initié en puissance.

Recommandation n° 3 :

L'IRSN recommande qu'EDF complète l'étude de l'accident de chute de grappe(s) avec cumul du manque de tension externe présentée dans le cadre du réexamen VD2 N4, en analysant la situation où l'alimentation normale des générateurs de vapeur par le système ARE est provisoirement maintenue et où les pompes primaires sont perdues à l'instant le plus pénalisant du transitoire. Dans le cas où les conséquences de cette situation ne seraient pas couvertes par celles de l'étude réalisée en considérant la perte du système ARE à l'instant initial, le rapport de sûreté des réacteurs N4 à l'édition VD2 devrait être modifié en conséquence.

Recommandation n° 4 :

L'IRSN recommande qu'EDF complète l'étude des ruptures de tuyauterie vapeur initiées en puissance avec cumul du manque de tension externe en considérant la perte des pompes primaires à un instant pénalisant pouvant survenir entre l'instant initial et tout instant de la phase d'augmentation de la puissance du réacteur, pour le cas des brèches situées à l'intérieur de l'enceinte du réacteur, ou à tout instant du palier de puissance stabilisée observé lorsque l'arrêt automatique du réacteur intervient tardivement, voire lorsqu'il n'est jamais sollicité, dans le cas des plus petites tailles de brèches situées à l'intérieur ou à l'extérieur de l'enceinte.

Recommandation n° 5 :

L'IRSN recommande qu'EDF retienne, pour les calculs de conséquences radiologiques de l'accident de perte de réfrigérant primaire de catégorie 4 et de l'éjection de grappe du palier N4, une hypothèse raisonnablement pessimiste de taux de renouvellement d'air des locaux « RIS/EAS » des bâtiments des auxiliaires de sauvegarde, tenant compte du fait que les taux de renouvellement d'air des locaux « contaminables » et des locaux « contaminables en iode » situés dans ces bâtiments sont de 4 vol.h⁻¹ au minimum.

Annexe 2 à l'Avis IRSN/2018-00036 du 13 février 2018

Observations

Observation n° 1 :

EDF a pris l'engagement suivant :

« La consolidation de l'incertitude EUN au type d'assemblage avec le code SIDERAL sera intégrée dans un nouvel indice de la note [...] d'estimation des performances de la méthode 3D pour mars 2018.

Ce nouvel indice justifiera par ailleurs la non-nécessité d'étudier la sensibilité à d'autres paramètres. »

Observation n° 2 :

L'IRSN estime que, en cohérence avec l'engagement qu'il a pris concernant son logiciel SIDERAL de dépouillement des cartes de flux (transmission des principes physiques et mathématiques du logiciel et de sa synthèse de validation), EDF devrait transmettre à l'ASN, avant mars 2018, le document présentant le détail des principes physiques et mathématiques du logiciel SQUALE.

Observation n° 3 :

EDF a pris les engagements suivants :

« Une justification de l'incertitude de mesure de la distribution axiale de puissance moyenne via l'instrumentation nucléaire in-core sera réalisée pour fin 2019 ».

« EDF fournira avant fin 2019 les éléments permettant de consolider les différents postes d'incertitude permettant d'évaluer l'incertitude globale sur le déséquilibre axial de puissance (DPAX) reconstruit par l'US et le SPIN N4. Ces éléments devront notamment :

- *justifier rigoureusement le poste relatif à la mesure interne de l'AO pour le palier N4 ;*
- *présenter les détails des justifications exposées [au cours de l'instruction] pour le poste relatif aux écarts incore-excore sur l'AO (retour d'expérience, méthode, etc.) ».*

« EDF confirme son engagement de mettre à jour [d'ici à la fin de l'année 2019] les documents constitutifs de la revue des incertitudes du SPIN et de l'US N4 [...], afin d'intégrer les compléments qui auront été réalisés d'une part dans le cadre de la consolidation des postes d'incertitudes liés au DPAX [...] et au DPAZN [...] et d'autre part dans le cadre des travaux de consolidation attendus sur la stratification en branche chaude ».

Observation n° 4 :

L'IRSN estime qu'EDF devrait compléter la note d'analyse d'exhaustivité des paramètres clés du dossier général d'évaluation de la sûreté des recharges des réacteurs N4 à l'état VD2, portant la démonstration associée à la prise en compte de la variabilité des recharges de combustible en exploitation, afin de présenter les études sur lesquelles elle s'appuie. En particulier, il conviendrait qu'EDF présente :

- les études relatives au cycle de variabilité « NE-4UO₂ » et les résultats justifiant que ce cycle est couvert par les études du rapport de sûreté ;
- les études de sensibilité au retour d'expérience des cycles d'exploitation de la gestion de combustible ALCADÉ, en explicitant les cycles retenus et en précisant les résultats permettant de conclure qu'il n'est pas nécessaire de vérifier certains paramètres dans les études de recharge ;
- les études réalisées pour sélectionner les conditions retenues pour le calcul des paramètres clés en recharge et les résultats qui justifient leur pertinence en cas de variabilité des cycles d'exploitation.

Observation n° 5 :

L'IRSN considère qu'EDF devrait modifier la présentation de la règle de l'aggravant unique dans la définition des règles d'études des conditions de fonctionnement de dimensionnement dans le rapport de sûreté des réacteurs N4 à l'état VD2 de manière à supprimer la mention faite à la « première sollicitation » du matériel.

Observation n° 6 :

EDF a pris l'engagement de « reprendre l'étude de la RTGV4 dans le référentiel VD2 du palier N4, afin de déterminer le cas pénalisant vis-à-vis des rejets radiologiques », en précisant les points suivants :

- « la reprise de l'étude RTGV4 VD2 N4 a pour objectif de déterminer et justifier le cas pénalisant d'un point de vue des conséquences radiologiques pour le transitoire de RTGV de 4^{ème} catégorie, à partir d'une étude thermohydraulique, d'une étude des conséquences radiologiques, et sur la base des hypothèses du réexamen de sûreté VD2 du palier N4 » ;
- « l'étude thermo-hydraulique de la RTGV4 sera formalisée dans une note d'étude [et] le chapitre [...] du rapport de sûreté VD2 N4 sera mis à jour » ;
- « l'étude des conséquences radiologiques de la RTGV4 fera l'objet d'une note d'étude et d'une révision du chapitre [...] du rapport de sûreté » ;

Les notes d'étude seront transmises avant l'échéance du 30 septembre 2018. La révision des chapitres correspondants dans le rapport de sûreté sera intégrée au « RDS de re-divergence du palier N4 à l'état VD2 ».

Observation n° 7 :

EDF a pris l'engagement suivant :

« Dans le cas d'une rupture de deux tubes de GV avec et sans cumul MDTE, la taille de brèche étant d'environ 1,5 pouces, [elle] est couverte par les tailles de brèches étudiées en APRP BI.

EDF fournira des analyses thermiques et thermomécaniques visant à démontrer l'intégrité de la gaine en cas de brèche intermédiaire survenant sur le circuit primaire pendant l'arrêt automatique du réacteur, avec et sans prise en compte de cumul de MDTE. Cette démarche générique [...] sera applicable au palier N4. La déclinaison au palier N4 sera disponible mi-2018. »

Observation n° 8 :

EDF a pris l'engagement suivant :

« EDF démontrera la maîtrise de la réactivité dans l'étude du scénario de RTGV4, à échéance du 30/09/2018. »

Observation n° 9 :

EDF a pris les engagements suivants :

« *La démarche découplée employée pour simuler la phase moyen terme du transitoire de RTV présente un fort conservatisme permettant de s'affranchir des sensibilités aux sur-débites en entrée cœur et à l'instant d'annulation du débit dans les boucles saines [mais] EDF réalisera tout de même [...] une étude de sensibilité couvrant l'incertitude relative à l'instant d'annulation des débits dans les boucles saines à échéance de mi-2018* ».

« *L'étude de la phase moyen terme du transitoire de RTV-2A dans le cas de la prolongation de cycle sera réalisée en utilisant la même démarche découplée ainsi que les mêmes codes de calcul que ceux mentionnés dans la note [...] relative au cycle naturel [...] en justifiant l'absence de crise d'ébullition ainsi que la non-fusion à cœur du combustible. Compte-tenu de l'impact pénalisant attendu des hypothèses relatives à la prolongation de cycle, des calculs de puissance linéique à fusion pourraient être réalisés afin de justifier la non-fusion à cœur du combustible. Les résultats seront transmis à l'échéance de mi-2018* ».

Observation n° 10 :

EDF a pris l'engagement suivant :

« *EDF vérifiera l'absence de retour en criticité en cas d'utilisation de la conduite en gavé-ouvert dans la phase long terme des scénarios de rupture sur un circuit secondaire (RTV ou RTE) à l'intérieur de l'enceinte de confinement [d'ici à] mi 2018.* »

Observation n° 11 :

L'IRSN estime qu'EDF devrait présenter, dans le rapport de sûreté des réacteurs N4 à l'état VD2, la comparaison au profil de qualification K1 en température, utilisé pour la qualification des matériels aux conditions accidentelles, de l'évolution de la température de l'atmosphère de l'enceinte. Compte tenu du dépassement du profil K1 constaté pour cette température dans l'étude réalisée pour le réexamen VD2 N4, la démonstration que la température de surface des matériels concernés ne dépasse pas celle du profil K1 devrait également y être présentée.

Observation n° 12 :

L'IRSN estime qu'EDF devrait fournir une étude de sensibilité permettant de vérifier l'absence d'influence significative, sur les évaluations des conséquences radiologiques des accidents de rupture du réservoir du système de contrôle chimique et volumétrique du circuit primaire et de rupture du réservoir de stockage du système de traitement des effluents gazeux, d'une évolution à la hausse des hypothèses de taux de renouvellement d'air considérées pour ces évaluations.