

Monsieur le Directeur de la Direction des centrales nucléaires

Fontenay-Aux-Roses, le 4 novembre 2025

AVIS D'EXPERTISE N° 2025-00110 DU 4 NOVEMBRE 2025

Objet :	EDF – Demande d'autorisation de création de deux réacteurs EPR2 sur le site de Penly – Expertise des études relatives au domaine de conception de référence et au domaine de conception étendu avec défaillances multiples.
Références :	[1] Avis IRSN n° 2022-00210 du 9 novembre 2022. [2] Saisine ASNR – CODEP-DCN-2025-015823 du 22 avril 2025. [3] Avis IRSN n° 2018-00013 du 19 janvier 2018.

En 2023, EDF a déposé une demande d'autorisation de création (DAC) d'une paire de réacteurs EPR2 sur le site de Penly et transmis le rapport préliminaire de sûreté (RPrS) associé.

Pour rappel, de manière anticipée, l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) a expertisé, en 2022, les règles d'études et les critères techniques d'acceptation des conditions de fonctionnement de référence et étendues, ainsi que la démarche d'élaboration de la liste des conditions de fonctionnement (en particulier celle du domaine étendu) de l'EPR2 associées à la DAC [1]. Les études d'accidents prennent en compte les demandes de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et les engagements pris par EDF à la suite de cette expertise anticipée.

Dans ce contexte, par la lettre citée en référence [2], la Direction des centrales nucléaires de l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR) a demandé l'avis de la Direction de l'expertise en sûreté de l'ASNR sur les sujets suivants :

- les évolutions de référentiels, de méthodes, d'outils de calculs et d'hypothèses retenus pour l'étude des scénarios du domaine de conception de référence (DBC) et du domaine de conception étendu avec défaillances multiples (DEC-A) par rapport à ceux utilisés pour l'EPR de Flamanville ;
- l'instrumentation du cœur et le système de protection du réacteur, en lien avec sa valorisation dans la démonstration de sûreté ;
- la gestion de combustible retenue (caractéristiques générales de la gestion...), ainsi que le dossier combustible (type d'assemblage de combustible, critères de tenue du combustible associés...) avec une attention particulière sur la prise en compte des écarts de distribution de puissance dans le cœur constatés lors des démarriages des premiers EPR ;
- les études d'accidents DBC, en vérifiant notamment la suffisance de la liste des transitoires étudiés explicitement¹ ainsi que le respect des critères techniques d'acceptation ;
- les études d'accidents DEC-A, avec notamment la déclinaison de la démarche DEC-A mise à jour, ainsi que la suffisance des transitoires étudiés explicitement et le respect des critères techniques d'acceptation ;
- les études justificatives particulières ;

¹ Au stade de la DAC, EDF a fourni les études qu'il a jugées dimensionnantes pour les systèmes de protection et de sauvegarde.

- les études de maîtrise du risque de criticité ;
- les études des masses et énergies libérées dans l'enceinte ainsi que dans les bâtiments périphériques, dans le but de définir le profil de qualification hors accident grave ;
- les études des conséquences radiologiques des situations DBC et DEC-A, en vérifiant notamment la suffisance des conditions étudiées explicitement ainsi que le respect des exigences associées ;
- les suites de l'instruction anticipée relative aux situations DBC et DEC-A et notamment les réponses apportées aux demandes de l'ASN ainsi qu'aux engagements pris par EDF.

En complément, la Direction des centrales nucléaires a demandé d'examiner les points suivants :

- le dimensionnement des vannes de décharge du pressuriseur et la justification apportée par EDF pour assurer une indépendance suffisante entre les 3^{ème} et 4^{ème} niveaux de la défense en profondeur ;
- les études d'accident relatives à la piscine d'entreposage du combustible.

Pour rappel, en 2016, EDF avait sollicité l'avis de l'ASN sur les principales options de sûreté d'un projet de nouveau modèle de réacteur de type EPR, dénommé EPR NM². Le dossier d'options de sûreté (DOS), présentant le référentiel de sûreté applicable et les principales options de conception à l'étude pour ce type de réacteur, avait fait l'objet d'une expertise de l'IRSN [3].

La Direction de l'expertise en sûreté présente ci-après les principales conclusions de son examen des études, tenant compte des éléments apportés par EDF à la suite de l'instruction anticipée précitée et des compléments apportés au cours de l'expertise. Il convient de noter que quatre études justificatives particulières sont présentées dans le RPrS, à savoir, l'accident de perte de réfrigérant primaire par grosse brèche primaire doublement débattue, l'accident de rupture de tuyauterie vapeur principale doublement débattue, l'accident de vidange de deux générateurs de vapeur et enfin les études évaluant le risque de rupture de gaine des crayons de combustible par le phénomène d'interaction pastille – gaine. Ces études n'ayant pas fait l'objet de remarques notables de la Direction de l'expertise en sûreté à l'issue de leur expertise, elles ne sont pas abordées par la suite.

Dans cet avis, le terme EPR ou « réacteur EPR » désigne le modèle construit sur le site de Flamanville et l'expression « parc historique » désigne l'ensemble des réacteurs des paliers 900, 1300 et 1450 MWe.

1. CORPS D'HYPOTHÈSES DES ÉTUDES D'ACCIDENTS

Référentiel des études de sûreté

Les règles pour la réalisation des études de sûreté et les critères techniques d'acceptation retenus sont similaires à ceux en vigueur pour le parc historique et pour l'EPR. Par ailleurs, les demandes formulées à la suite des expertises réalisées dans le cadre de la préparation des réunions du Groupe permanent pour les réacteurs nucléaires (GPR) qui se sont tenues en 2014 sur le « référentiel de brèches primaires » et en 2017 sur les « critères de tenue du combustible » ont été prises en compte, ce qui est satisfaisant. Cependant, un certain nombre de sujets pourraient faire l'objet d'une expertise complémentaire en amont de l'instruction du dossier associé à la demande de mise en service (DMES), compte tenu de l'évolution des connaissances acquises depuis.

Pour la DMES, EDF intégrera également la prise en compte de phénomènes physiques non considérés à ce jour dans les études associées à la DAC, mais qui ont des effets défavorables sur la démonstration de sûreté. Cela concerne en particulier la déformation latérale attendue en fonctionnement normal des assemblages de combustible, le conditionnement mécanique des crayons de combustible³ et la présence de crayons inétanches.

Concernant la maîtrise de la réactivité, dans le cadre de l'expertise anticipée, l'IRSN avait estimé [1] que, pour les études du domaine de conception de référence, « *la conception de l'EPR2 [devait] viser l'absence de retour critique après l'AAR⁴* ». À cet égard, le modèle EPR2 présente des évolutions favorables en comparaison de l'EPR (voir le paragraphe 6). Cependant, pour la vérification de l'atteinte de l'état sûr pour les scénarios du domaine de conception étendu, scénarios étudiés avec des règles d'étude relaxées, EDF retient le requis d'une marge à la

² EPR Nouveau Modèle, première configuration technique du réacteur EPR2.

³ Le comportement thermomécanique des crayons de combustible, lors des variations de puissance liées à des transitoires d'exploitation normale, est susceptible de pénaliser l'état initial de transitoires incidentels et accidentels.

⁴ Arrêt automatique du réacteur. Il entraîne notamment la chute par gravité des grappes de commande.

criticité nulle. La Direction de l'expertise en sûreté constate qu'il s'agit d'un critère moins exigeant que celui retenu pour le domaine de conception de référence. Elle sera donc vigilante quant à la suffisance de la marge à la criticité lors de l'expertise de la démonstration de l'atteinte de l'état sûr pour ces conditions de fonctionnement.

Évolutions entre l'EPR et l'EPR2 ayant un effet sur les études de sûreté

La chaudière de l'EPR2 est reconduite en grande partie de celle conçue pour l'EPR, avec notamment un circuit primaire comportant quatre boucles. Les principales évolutions ayant un effet sur les études de sûreté concernent :

- la puissance de la chaudière, augmentée de 4300 à 4590 MW_{th} ;
- la gestion de combustible, qui inclut la possibilité d'introduire du combustible MOX⁵ dans le cœur ;
- le changement de technologie des soupapes de sûreté du pressuriseur, pour retenir une technologie identique à celle des soupapes de type SEBIM™ retenue sur le parc historique (avec trois tandems de soupapes), alors que l'EPR utilise les soupapes pilotées de type SEMPELL™ ;
- l'ajout d'une seconde pompe sur le train n° 3 du système PTR⁶ ;
- une architecture globale des systèmes de sauvegarde répartie sur trois trains au lieu de quatre :
 - le système d'injection de sécurité (RIS) ne comporte plus que trois pompes moyenne pression et trois pompes basse pression⁷. Ainsi, ce système ne pourra pas injecter de l'eau borée dans la boucle n° 1, en dehors de celle provenant d'un accumulateur,
 - le système de borication de sécurité (RBS) bénéficie de l'ajout d'un troisième train. Les pompes des trains n° 2 et n° 3 injectent chacune dans une boucle, respectivement dans la boucle n° 2 et n° 3, tandis que la pompe du train n° 1 injecte simultanément dans les boucles n° 1 et n° 4,
 - le système d'alimentation de secours (ASG) des générateurs de vapeur (GV) reste avec quatre pompes réparties sur trois trains, le train n° 3 (avec deux pompes) alimentant les GV n° 3 et n° 4.

Enfin, les études de sûreté présentées dans le RPrS sont basées sur la configuration de l'installation dite « RC1.1 ». EDF a depuis prévu des modifications liées à la configuration en cours « RC1.2 », susceptibles d'avoir un effet sur ces études, pour tenir compte du retour d'expérience des premiers EPR en fonctionnement. C'est notamment le cas de l'ajout d'un « double tambour » (DDM) en fond de cuve qui vise à limiter les fluctuations de vitesse du fluide primaire en entrée du cœur et les sollicitations des assemblages de combustible en fonctionnement normal. Par ailleurs, EDF retient l'utilisation d'assemblages de combustible à structure renforcée pour tenir compte du retour d'expérience acquis avec les premiers EPR. L'examen par la Direction de l'expertise en sûreté a tenu compte, dans la mesure du possible, de ces évolutions.

Méthodes et outils de calcul scientifiques

Les méthodes utilisées pour les études de sûreté de l'EPR sont en général conservées pour l'EPR2. Néanmoins, certaines études utilisent des méthodes plus avancées (notamment pour le retrait incontrôlé d'une grappe en puissance et l'accident de perte de réfrigérant primaire avec une brèche de taille intermédiaire). Ces méthodes ont fait l'objet d'expertises dédiées et prennent en compte, dans la mesure du possible, des évolutions en cohérence avec ces instructions.

La démonstration de sûreté produite dans le RPrS de l'EPR2 reprend majoritairement les outils de calcul scientifique (OCS) utilisés pour l'EPR, avec une exception concernant les études liées aux masses et énergies libérées dans l'enceinte de confinement. Il convient de noter que la mise à jour de certaines études du rapport de sûreté associé à la DMES devrait être réalisée avec de nouveaux OCS dont les dossiers de validation sont en cours d'expertise.

⁵ Oxydes mixtes d'uranium et de plutonium.

⁶ Système de traitement et de refroidissement de l'eau des piscines.

⁷ Le système RIS conserve toutefois une réserve d'eau borée (accumulateur) par boucle.

Instrumentation du cœur

L'instrumentation neutronique interne de l'EPR2 est reconduite de celle de l'EPR, et repose sur un double système :

- une instrumentation fixe de 12 cannes de collectrons cobalt hexa-étagés, assurant la surveillance du cœur et la protection contre les transitoires accidentels ;
- une instrumentation mobile avec des aérobilles d'acier dopées au vanadium pour calibrer périodiquement les collectrons.

Si la résolution de l'instrumentation mobile peut apparaître en retrait en comparaison de celle de l'instrumentation disponible sur le parc historique⁸, **la Direction de l'expertise en sûreté convient que la solution retenue, liée au choix de ne pas recourir à des traversées du fond de cuve, constitue un compromis raisonnable entre la précision de l'instrumentation neutronique et la gestion des accidents graves.**

Conception du combustible

L'assemblage de combustible présenté dans le RPrS de l'EPR2 est un assemblage de conception Framatome composé de crayons de combustible à gainage M5 et disposant d'une structure renforcée. Par ailleurs, un traitement thermique des ressorts de grille de mélange est intégré pour limiter le risque de rupture de ces ressorts par corrosion sous contrainte. **Les justifications de la conception thermomécanique des crayons de combustible et de la conception mécanique de l'assemblage présentées dans le RPrS sont jugées acceptables à ce stade.**

Pour la DMES de l'EPR2, une nouvelle conception plus robuste d'assemblage sera utilisée pour tenir compte du retour d'expérience acquis avec les premiers EPR. **À ce stade, la Direction de l'expertise en sûreté estime a priori positive l'utilisation d'assemblages de nouvelle conception, sujet qui fera l'objet d'une expertise dédiée.**

Conception neutronique

La gestion de combustible considérée dans les études du RPrS inclut à la fois des cycles avec du combustible UNE (uranium naturel enrichi), avec une certaine variabilité (nombre d'assemblages neufs, durée des campagnes, etc.), et deux cycles avec du combustible MOX, afin de vérifier la faisabilité de l'utilisation de ce combustible sur le modèle EPR2.

Pour les cycles utilisant exclusivement du combustible UNE, les plans de chargement ont été optimisés de manière à rendre certaines données neutroniques plus favorables pour la sûreté. Pour les cycles avec du combustible MOX, un travail similaire sera réalisé pour la DMES, ce qui est satisfaisant.

Par ailleurs, des écarts sur la distribution de puissance entre les prédictions issues de l'OCS utilisé et les mesures *in situ* ont été observés sur les premiers EPR. À cet égard, EDF a produit une étude spécifique pour évaluer les conséquences de ces écarts sur les études produites dans le RPrS de l'EPR2, en se basant sur les travaux similaires effectués sur le réacteur EPR, et dont il est tenu compte dans l'expertise des conditions de fonctionnement.

Conception thermohydraulique

La conception thermohydraulique vise à démontrer l'absence de perte d'intégrité de la première barrière de confinement (la gaine des crayons de combustible), c'est-à-dire à vérifier que le dimensionnement des seuils de surveillance et de protection du cœur est suffisant pour écarter la crise d'ébullition. À cet égard, EDF utilise la corrélation de flux critique⁹ développée pour les assemblages de l'EPR de Flamanville de conception identique à celle des assemblages prévus dans le RPrS de l'EPR2, ce qui est acceptable. Cependant, les conclusions de l'expertise en cours concernant son applicabilité en présence de lames d'eau élargies résultant de la déformation latérale des assemblages devront être prises en compte dans le cadre de la DMES. Par ailleurs, les valeurs de

⁸ Sur le parc historique, l'instrumentation interne mobile du cœur est constituée de chambres à fission mobiles qui s'insèrent au niveau du cœur via des pénétrations en fond de cuve.

⁹ La corrélation de flux critique permet, en fonction des conditions thermohydrauliques locales (pression, titre, vitesse massique du réfrigérant) de prédire le flux critique, c'est-à-dire le niveau de flux thermique qui conduirait à l'apparition d'un film de vapeur (crise d'ébullition) conduisant à une forte dégradation des conditions de refroidissement du combustible.

seuils de surveillance et de protection des chaînes permettant de se prémunir du risque de crise d'ébullition devront être consolidées afin de justifier les incertitudes retenues et de tenir compte du retour d'expérience des premiers EPR quant à la défaillance des collectrons.

Enfin, EDF étudie la possibilité d'introduire une nouvelle conception d'assemblage de combustible munie de grilles intermédiaires de mélange (GIM), visant notamment à augmenter les marges vis-à-vis du risque d'entrée en crise d'ébullition. **À cet égard, la Direction de l'expertise en sûreté souligne l'intérêt de charger les réacteurs EPR2, dès la tête de série, avec un cœur composé uniquement d'assemblages avec GIM, compte tenu des avantages attendus pour ce produit combustible.**

2. ÉTUDES DES CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT DE RÉFÉRENCE

Dans ce paragraphe, la Direction de l'expertise en sûreté examine tout d'abord la suffisance de la liste des transitoires étudiés dans le RPrS, puis présente ses principales conclusions sur les études des conditions de fonctionnement de référence. Certaines études, notamment celles associées à la piscine du bâtiment combustible, n'appellent pas de remarques particulières, et ne sont donc pas présentées par la suite.

Pour rappel, sur l'EPR2 comme sur l'EPR, les conditions de fonctionnement de référence sont réparties en quatre catégories, du fonctionnement normal (catégorie 1) aux accidents dits hypothétiques (catégorie 4). Les critères techniques d'acceptation associés sont d'autant plus restrictifs que la fréquence d'occurrence estimée est élevée. Pour la catégorie 4, le cumul du manque de tension externe (MDTE) est systématique s'il s'avère pénalisant. Pour les catégories 2 et 3, le cumul du MDTE doit être étudié, mais avec l'objectif du respect des critères de catégorie 4.

Suffisance de la liste des transitoires étudiés dans le RPrS

Au stade de la DAC, les transitoires étudiés explicitement sont ceux participant au dimensionnement des systèmes de protection et de sauvegarde, ou impliquant l'utilisation de nouvelles méthodes ou de nouveaux OCS.

L'absence d'étude explicite des autres transitoires est justifiée par argumentaire. À l'issue de son analyse, la Direction de l'expertise en sûreté estime acceptables les éléments apportés par EDF pour justifier au stade de la DAC l'absence d'études explicites pour certains transitoires, à l'exception du cas spécifique de l'initiateur d'ouverture intempestive d'une soupape du pressuriseur (OISP), sujet abordé ci-après.

Éjection d'une grappe de commande

L'accident d'éjection d'une grappe de contrôle (EDG) résulte de la rupture de l'enceinte sous pression d'un mécanisme de commande de grappe et peut conduire à une brèche sur le couvercle de la cuve. Il se caractérise par un apport de réactivité supposé se produire en 0,1 seconde, pouvant conduire à une excursion de puissance. La Direction de l'expertise en sûreté constate que les cas les plus limitatifs vis-à-vis des critères techniques d'acceptation bénéficient de l'amélioration des données neutroniques de la gestion, amenant à des résultats plus favorables que ceux observés sur l'EPR.

Par ailleurs, la phase moyen terme de l'EDG bénéficie des modifications associées au RBS et d'un nouveau signal de protection permettant de prévenir le sur-refroidissement observé sur le parc historique, lequel peut amener à des retours en puissance après l'AAR. À cet égard, la conception de l'EPR2 se révèle adaptée pour prévenir le retour en criticité après l'AAR pour cet accident.

Rupture d'une tuyauterie vapeur

L'accident de rupture d'une tuyauterie vapeur (RTV) est étudié à puissance nominale et à puissance nulle, et se traduit par un refroidissement notable du circuit primaire, entraînant un apport en réactivité.

À puissance nominale, l'étude avec cumul du manque de tension externe (MDTE) conduit à un nombre de crayons entrant en crise d'ébullition inférieur au critère de 10 %. Cette étude tient compte des premières évaluations de l'effet, sur les mélanges en entrée du cœur, de la présence du DDM en fond de cuve. Ces résultats seront à confirmer à la suite de la nouvelle campagne d'essais thermohydrauliques en cours, intégrant ce nouveau dispositif. Par ailleurs, à ce stade, il n'est pas exclu que, après l'AAR, un retour en puissance se produise, ce qui provoquerait, après la crise d'ébullition, une deuxième sollicitation thermique des gaines de crayons de combustible et donc potentiellement leur perte d'intégrité. **À l'issue de l'expertise, EDF s'est engagé à réaliser,**

à échéance de la DMES, des analyses complémentaires afin de démontrer, soit l'absence d'entrée en crise d'ébullition, soit l'absence de retour en puissance après AAR, ce qui est satisfaisant.

À puissance nulle, la reprise de l'étude de la RTV, tenant compte à la fois du DDM et de la correction d'une erreur dans la modélisation, montre un retour en puissance pendant une durée significative ainsi qu'une augmentation de la puissance linéaire maximale conduisant à ne pas respecter le critère technique d'acceptation. **Une optimisation de la gestion prévisionnelle de combustible est envisagée par EDF à l'échéance de la DMES, en augmentant notamment les marges d'arrêt, dans l'objectif de permettre le respect du critère. Ce point devra faire l'objet d'une attention particulière.**

Manque de tension externe

L'étude de manque de tension externe (MDTE) comprend normalement un volet dit « moyen-terme », dont l'objectif est de vérifier l'absence de relâchement de fluide primaire dans l'enceinte pour les conditions de fonctionnement de catégorie 2. L'expertise des études de l'EPR a montré que, en cas de MDTE, le réservoir de décharge du pressuriseur (RDP) se remplit notablement. Compte tenu de la puissance plus élevée de la chaudière de l'EPR2, il n'est donc pas acquis que le volume du RDP soit suffisant pour écarter un relâchement de fluide primaire dans l'enceinte de confinement. À l'issue de l'expertise, EDF s'est engagé à apporter la démonstration de l'intégrité du RDP de manière anticipée par rapport à la DMES, en valorisant l'ensemble des matériels disponibles. **Il appartiendra ainsi à EDF de proposer des modifications si l'étude montre un relâchement de fluide primaire dans l'enceinte de confinement.**

Rupture de tube(s) de générateur de vapeur

L'accident de rupture de tube(s) de générateur de vapeur (un tube en catégorie 3 et deux tubes en catégorie 4) se traduit par une fuite du circuit primaire vers le circuit secondaire, entraînant un risque de contamination de l'eau du circuit secondaire ainsi qu'un risque de rejets à l'atmosphère par le système de décharge à l'atmosphère (VDA). Les réacteurs EPR et EPR2 sont conçus pour éviter les rejets liquides en cas de RTGV, au travers notamment du dimensionnement des systèmes RIS et VDA, ce qui est une amélioration par rapport au parc historique.

Pour l'EPR2, EDF a supprimé, en comparaison au réacteur EPR, la fonction automatique de refroidissement partiel par le GCT¹⁰, ce qui constitue potentiellement une régression au regard des rejets en RTGV. En effet, le refroidissement partiel par le GCT permet de prévenir le rejet de vapeur à l'atmosphère. Dans le cas de l'EPR2, pour éviter les rejets, il est nécessaire que l'opérateur intervienne avant le démarrage du refroidissement partiel automatique *via* le VDA.

En revanche, EDF a souligné que la suppression de cet automatisme permet d'exclure l'occurrence de l'incident d'augmentation excessive de débit vapeur pouvant être initiée par une activation intempestive du refroidissement partiel par le GCT, ce qui est bénéfique pour la sûreté, ce dont la Direction de l'expertise en sûreté convient. Par ailleurs, en cas de RTGV, même si l'opérateur n'était pas en mesure d'agir avant l'activation du refroidissement partiel automatique *via* le VDA, les rejets étant uniquement sous la forme de vapeur, les conséquences radiologiques seraient limitées. **Ainsi, la Direction de l'expertise en sûreté estime acceptable, sur le plan de la sûreté, la suppression de la fonction de refroidissement partiel automatique via le GCT.**

Certaines hypothèses retenues dans les études de RTGV ont été questionnées au cours de l'expertise, notamment du fait de la multiplicité des paramètres à considérer. **À l'issue de l'expertise, EDF s'est engagé à fournir, à l'échéance de la DMES, des études de sensibilité pour justifier le choix des hypothèses retenues, ce qui est satisfaisant sur le principe.**

Enfin, l'accident de RTGV conduisant à une perte d'intégrité de la deuxième barrière de confinement (le circuit primaire) avec un bipasse de la troisième barrière (l'enceinte de confinement), l'intégrité de la première barrière, la gaine, doit être démontrée. **Il appartiendra à EDF d'apporter cette démonstration pour les conditions de fonctionnement de RTGV de 3^e et 4^e catégorie, à l'échéance de la DMES.**

¹⁰ GCT : groupe de contournement de la turbine vers le condenseur. La vapeur extraite, par ce système, du GV est dirigée vers le condenseur.

Accident de perte de réfrigérant primaire

L'accident de perte de réfrigérant primaire se traduit par une dépressurisation importante du circuit primaire et un risque de découvrement des assemblages de combustible, pouvant conduire à la dégradation des gaines et à la dispersion d'une partie du combustible.

Les conséquences de cet accident sont principalement limitées par l'injection d'eau borée par le système RIS, dont les pompes aspirent dans le réservoir IRWST situé au fond de l'enceinte. **Concernant ce dernier, EDF s'est engagé à vérifier que le niveau d'eau dans l'IRWST restera suffisant pour garantir la disponibilité des pompes RIS dans l'ensemble des situations qui le requièrent, ce qui est satisfaisant.**

Pour le réacteur EPR2, cet accident est étudié avec une méthode statistique et qui permet notamment de prendre en compte l'évolution des connaissances sur le comportement du combustible lors de tels scénarios. Ceci constitue une évolution par rapport à l'EPR. Cette méthode s'appuie sur une modélisation du réacteur basée sur une représentation multi-dimensionnelle du cœur et de la descente annulaire de la cuve. Par ailleurs, elle prend en compte les incertitudes sur les conditions initiales et aux limites, sur les modèles physiques de l'OCS ainsi que sur les caractéristiques du scénario.

L'expertise de cette méthode et de l'OCS utilisé a révélé un certain nombre de lacunes, ce qui a conduit à retenir une valeur « repère » à ne pas dépasser pour la déformation des gaines, plus restrictive que les critères de sûreté, ainsi que des conservatisme sur la modélisation des éléments multi-dimensionnels et sur les paramètres physiques les plus influents.

L'étude présentée par l'exploitant montre des marges significatives par rapport aux critères de sûreté. Toutefois, les résultats obtenus en termes de déformation des gaines sont relativement proches de la valeur « repère ». Or, cette déformation est très sensible aux conditions thermohydrauliques et thermomécaniques locales, et des effets falaises ne peuvent être exclus. En outre, le calendrier de réalisation des études du RPrS n'a pas permis à l'exploitant de prendre en compte certaines demandes issues de l'expertise de la méthode. **En conséquence, l'exploitant s'est engagé à reprendre dans les meilleurs délais cette étude, ce qui est satisfaisant.**

Ouverture intempestive d'une soupape du pressuriseur

Le transitoire d'ouverture intempestive d'une soupape de pressuriseur peut conduire à un nombre élevé de crayons de combustible entrant en crise d'ébullition en raison de la dépressurisation rapide du circuit primaire engendrée par l'ouverture de la soupape.

L'étude réalisée sur l'EPR montre, pour le cas avec cumul du MDTE, une marge très faible par rapport au critère de 10 %. Tenant compte de la puissance plus élevée de la chaudière de l'EPR2, la Direction de l'expertise en sûreté estime que cette étude aurait dû être fournie pour le RPrS. À l'issue de l'expertise, EDF s'est engagé à réaliser cette étude de manière anticipée par rapport à la DMES, considérant à ce stade que cette étude n'est pas dimensionnante pour le système de protection. **Il appartiendra à EDF d'ajuster, le cas échéant, les réglages des seuils de protection afin d'assurer le respect des critères.**

Évolutions de pression et température dans les bâtiments

L'objectif de ces études est d'évaluer, en cas de rupture de tuyauterie à haute énergie, les évolutions temporelles enveloppes de pression et température dans l'enceinte de confinement du bâtiment réacteur, dans les différents compartiments d'intérêt (appelés aussi casemates) des bâtiments auxiliaires de sauvegarde et dans le bâtiment combustible. Elles permettent de déterminer la pression maximale atteinte dans le local considéré, qui doit être inférieure à sa pression de dimensionnement, et les conditions enveloppes de pression et de température vues par les matériels requis en situation accidentelle, qui doivent rester inférieures à leur profil de qualification. Ces évaluations utilisent, comme données d'entrée, les masses et énergies libérées (MEL) à la brèche.

À ce stade, la Direction de l'expertise en sûreté n'a pas de remarque concernant les évaluations de pression et température dans l'enceinte du bâtiment réacteur. Il est à noter que la vérification de la pression de dimensionnement de l'enceinte du bâtiment réacteur montre une marge au critère notable. Toutefois, la méthode utilisée pour évaluer les MEL en cas de brèche sur le circuit primaire n'a pas fait l'objet d'une expertise à ce jour.

Concernant l'évaluation des pression et température dans les casemates où une partie du système RIS est localisée, EDF s'est engagé à compléter sur plusieurs points ses études à l'échéance de la DMES, ce qui est

satisfaisant. Toutefois, la Direction de l'expertise en sûreté note que, dans la méthode utilisée pour ces évaluations, les incertitudes des modèles physiques de l'outil de calcul utilisé pour évaluer les MEL n'ont pas été prises en compte. **Ainsi, les éléments présentés par EDF sont en l'état insuffisants pour assurer du caractère enveloppe des résultats de simulation. L'impact de cette réserve fera l'objet d'échanges dans le cadre de l'expertise à venir sur la qualification de cet outil.**

Enfin, concernant l'évaluation des pression et température dans les autres casemates et dans le bâtiment combustible, la Direction de l'expertise en sûreté n'a pas de remarque.

Cumul générique du MDTE

Pour le RPrS de l'EPR2, une nouvelle démarche de prise en compte du cumul du manque de tension externe est proposée, afin de couvrir de façon générique la plupart des conditions de fonctionnement de référence, à savoir celles vérifiant l'absence d'entrée en crise d'ébullition sans cumul du MDTE. Cette démarche consiste à considérer un état initial à la limite de la crise d'ébullition en pénalisant la puissance thermique du cœur, puis à simuler le transitoire de MDTE à partir de cet état. EDF vérifie ensuite le respect des critères de catégorie 4. **La Direction de l'expertise de sûreté estime acceptable cette démarche qui présente des conservatismes suffisants.**

3. ÉTUDES DES CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT ÉTENDUES (DEC-A)

Des conditions de fonctionnement étendues associées à des dispositions (parades), dites DEC-A, sont définies de manière à prévenir la fusion du combustible dans des situations plus complexes que celles du dimensionnement de référence.

Dans ce paragraphe, la démarche d'identification de ces conditions de fonctionnement est tout d'abord présentée ainsi qu'une synthèse de sa déclinaison. Puis, l'analyse des conditions de fonctionnement étendues ayant fait l'objet de réserves de la Direction de l'expertise en sûreté est développée.

Démarche d'étude

Pour l'EPR2, la démarche d'identification des conditions de fonctionnement et dispositions DEC-A est différente de celle utilisée pour le parc nucléaire historique et l'EPR. Elle consiste en une analyse déterministe supportée par des éléments de nature probabiliste (étapes 1 à 5) avec un complément (étape 6) basé sur l'étude probabiliste de sûreté de niveau 1 « événements internes » (EPS1 EI).

Dans les étapes 1 à 5 de la démarche DEC-A, EDF identifie des scénarios crédibles de deux types :

- le cumul d'une condition de fonctionnement de référence de catégorie 2 ou 3, avec une défaillance de cause commune (DCC) de composants redondants affectant une parade, à cette situation ;
- une DCC affectant un système utilisé en fonctionnement normal et conduisant à un initiateur d'accident.

Pour ces scénarios, EDF définit ensuite des conditions de fonctionnement et des dispositions DEC-A.

L'étape 6 permet de compléter les conditions et dispositions obtenues en recherchant des dispositions DEC-A dont la valorisation induit une réduction du risque de fusion du cœur égale à 5.10^{-8} /année.réacteur ou une réduction du risque de découverrement du combustible entreposé dans la piscine de désactivation égale à 1.10^{-8} /année.réacteur.

Chacune de ces dispositions bénéficiera d'un classement de sûreté et d'exigences en exploitation adaptés à leur importance pour la prévention du risque de fusion du cœur.

La Direction de l'expertise en sûreté considère que la démarche d'identification des conditions de fonctionnement et dispositions DEC-A mise en œuvre par EDF est pertinente et a permis d'identifier, à un stade précoce de la conception, des besoins de diversification et de nombreuses dispositions DEC-A, ce qui est satisfaisant. Toutefois, les étapes 1 à 5 comportent des simplifications et des limitations. Aussi, la Direction de l'expertise en sûreté rappelle l'importance de l'étape 6 pour conforter la liste des conditions de fonctionnement et dispositions DEC-A à retenir pour l'EPR2.

Enfin, la déclinaison pratique de la démarche DEC-A au stade de la DAC comporte des incohérences ainsi que des lacunes en termes de documentation. **En conséquence, la déclinaison de la démarche DEC-A au stade de la DMES devra s'appuyer sur un état de conception finalisé et faire l'objet d'une documentation suffisante à toutes les étapes.**

Perte totale de l'alimentation en eau des GV

Sur l'EPR2, de la même manière que sur l'EPR, le sommet du pressuriseur comprend, en plus des soupapes de sûreté, deux lignes de décharge indépendantes, requises, d'une part, pour la réalisation de la fonction « gavé-ouvert »¹¹ dans les situations DEC-A de perte totale de l'alimentation en eau des GV (PTEA), d'autre part, pour l'élimination pratique du risque de fusion du cœur à haute pression dans les situations DEC-B¹².

L'étude réalisée en support du RPrS considère l'ouverture des deux lignes de décharge lors de la réalisation de la fonction « gavé-ouvert », contrairement à l'étude réalisée pour l'EPR pour laquelle la fonction gavé-ouvert est réalisée par une seule ligne de décharge, ce qui assure l'indépendance des 3^{ème} et 4^{ème} niveaux de la défense en profondeur sur ce réacteur.

Par ailleurs, cette étude montre que la mise en œuvre par l'opérateur de la parade « gavé-ouvert » provoque un découvrement transitoire des assemblages de combustible, qui conduit à une augmentation importante des températures des gaines de combustible, contrairement aux réacteurs du parc historique¹³. Au cours de l'expertise, EDF a présenté les différents leviers qu'il avait étudiés pour éviter cette situation. Toutefois, l'analyse réalisée avait amené EDF à conclure à l'absence de moyens qui permettraient d'augmenter la capacité d'injection afin d'empêcher le découvrement du cœur à la suite de la mise en œuvre du gavé-ouvert, sans avoir des effets défavorables sur la mitigation de conditions de fonctionnement de probabilité d'occurrence plus élevée, comme la RTGV.

D'une manière générale, la Direction de l'expertise en sûreté estime qu'une action de l'opérateur ne devrait pas provoquer une vidange importante du circuit primaire jusqu'à découvrir les assemblages de combustible. Elle considère que certains leviers, pour l'heure non étudiés par EDF et qui pourraient faciliter la dépressurisation du circuit primaire et donc permettre d'atteindre plus rapidement la pression à laquelle le système RIS peut injecter de l'eau, méritent d'être investigués. **Ainsi, la Direction de l'expertise en sûreté recommande qu'EDF poursuive ses investigations visant à réduire le risque de découvrir les assemblages de combustible en cas de passage en « gavé-ouvert » (cf. recommandation en annexe).**

Concernant la suffisance de l'indépendance des 3^{ème} et 4^{ème} niveaux de la défense en profondeur et donc du dimensionnement des lignes de décharge, la Direction de l'expertise en sûreté estime que, pour assurer cette indépendance, il est nécessaire de démontrer que le recours à une seule ligne de décharge est suffisant. **Compte tenu du fait que la parade gavé-ouvert n'est pas jugée satisfaisante à ce stade, la Direction de l'expertise en sûreté se positionnera sur ce point lors de l'expertise des études qui seront transmises à la DMES.**

Manque de tension généralisé

La situation de manque de tension généralisé (MDTG) est caractérisée par la perte des alimentations électriques externes cumulée à la perte des diesels principaux de secours.

Le diesel diversifié dédié à la gestion des transitoires DEC-A démarre alors automatiquement et réalimente électriquement les équipements du train n° 3 jugés nécessaires à la maîtrise de la situation, permettant notamment d'atteindre un état où le refroidissement du réacteur est assuré par le système de refroidissement à l'arrêt. **Ce dernier point constitue une amélioration de sûreté par rapport au parc historique et à l'EPR.**

Toutefois, l'étude réalisée en support au RPrS considère que la puissance du diesel diversifié ne permet d'alimenter qu'une seule des deux pompes ASG du train n° 3, ce qui entraîne une forte dissymétrie au sein du circuit primaire dans ce scénario. En effet, les GV n° 1 et n° 2 n'étant plus alimentés, les boucles primaires correspondantes restent chaudes et de la vapeur apparaît lors de la dépressurisation, contrairement aux deux autres boucles. Cette dissymétrie présente plusieurs risques, notamment le risque d'aspiration d'eau chaude en provenance des boucles non refroidies lors de la connexion du système de refroidissement à l'arrêt et le risque d'un choc froid dans les GV asséchés en cas de redémarrage de l'ASG, sujets qui devront faire l'objet d'une

¹¹ En cas de perte totale de l'alimentation en eau des GV, l'opérateur est orienté vers une conduite mettant en œuvre le « gavé-ouvert » pour assurer l'évacuation de la puissance résiduelle. La conduite en gavé-ouvert consiste à ouvrir les deux lignes de décharges localisées au sommet du pressuriseur, afin de dépressuriser le circuit primaire et ainsi permettre à l'injection de sécurité de « gaver » le circuit primaire en injectant de l'eau froide.

¹² Les situations DEC-B correspondent aux conditions de fonctionnement étendues avec fusion du cœur.

¹³ Le découvrement du cœur à la suite de la mise en œuvre du « gavé-ouvert » est également observé pour l'EPR.

attention particulière. La Direction de l'expertise en sûreté considère en outre que les équipes de conduite devront être formées spécifiquement à ce transitoire atypique.

Enfin, il appartient à EDF de prendre en compte, dans les procédures de conduite accidentelles, la possibilité d'alimenter en eau l'ensemble des GV en fonction de la puissance réellement disponible du diesel diversifié DEC-A et des matériels qu'il alimente, les procédures de conduite ne se limitant pas au seul scénario présenté dans le RPrS.

4. MAÎTRISE DU RISQUE DE CRITICITÉ

Le chapitre du RPrS consacré aux études de maîtrise du risque de criticité décrit la démarche de prise en compte de ce risque pour les activités réalisées dans le bâtiment combustible, ainsi que dans le bâtiment réacteur dans les états « cuve ouverte » (critères d'admissibilité, situations à analyser et exigences à respecter dans les études de criticité). À ce titre, il définit les situations normales, incidentielles et accidentielles à prendre en compte et les lignes de défense associées.

La Direction de l'expertise en sûreté a examiné en particulier la cohérence des analyses réalisées par EDF avec celles réalisées pour l'EPR, ainsi que la mise à jour par EDF du référentiel criticité à la suite de l'expertise réalisée dans le cadre du 4^{ème} réexamen périodique du palier 1300 MWe (RP4 1300).

À l'issue de son expertise, la Direction de l'expertise en sûreté ne formule pas de réserves notables concernant le risque de criticité dans le bâtiment combustible. **Elle souligne toutefois qu'il appartiendra à EDF d'apporter des compléments d'analyse dans le cadre de la DMES, notamment pour les situations de déformation de l'assemblage de combustible en cas de chute ou pour les situations normales de chargement ou de déchargement des assemblages de combustible dans les emballages de transport.**

Concernant le risque de criticité dans le bâtiment réacteur, les analyses associées aux situations retenues par EDF n'appellent pas de remarque à ce stade.

En conclusion, la Direction de l'expertise en sûreté estime que la prévention du risque de criticité, telle que présentée dans le RPrS, est satisfaisante à ce stade du projet.

5. ÉTUDES DES CONSÉQUENCES RADIOLOGIQUES

En termes de conséquences radiologiques, EDF vise à s'assurer que les accidents sans fusion du cœur ou de combustible n'entraînent pas d'impact radiologique hors-site ou un impact radiologique mineur, et à réduire, autant que possible, dans des conditions économiquement acceptables, les rejets de substances radioactives pour l'ensemble des conditions de fonctionnement.

À l'issue de son expertise des études de conséquences radiologiques, la Direction de l'expertise en sûreté considère acceptable, au stade de la DAC, l'approche d'EDF consistant à fournir une évaluation des conséquences radiologiques pour les conditions de fonctionnement de référence identifiées comme les plus limitatives, et à fournir, pour un certain nombre d'accidents, une enveloppe des rejets en s'appuyant sur un accident considéré « enveloppe » pour lequel une évaluation des conséquences radiologiques a été effectuée.

En ce qui concerne les hypothèses considérées par EDF pour ses évaluations de rejets hors de l'enceinte de confinement, la Direction de l'expertise en sûreté les estime acceptables au stade de la DAC. Certaines d'entre elles devront toutefois être confortées une fois la conception finalisée.

Par ailleurs, la Direction de l'expertise en sûreté considère acceptables les scénarios et la méthode retenus par EDF pour l'évaluation des conséquences radiologiques, pour une approche palier, au stade de la DAC. Il appartiendra à EDF, comme il s'y est engagé, de mettre en œuvre, à l'échéance de la DMES, la méthode d'évaluation des conséquences radiologiques mise en œuvre dans le cadre du RP4 1300, plus réaliste, tenant compte des statistiques météorologiques.

En conclusion, la Direction de l'expertise en sûreté estime que les marges existantes entre les conséquences radiologiques évaluées par EDF et les valeurs de doses associées à la mise en œuvre des actions de protection de la population permettent de considérer que les objectifs qu'EDF s'est fixés en ce qui concerne les conséquences radiologiques associées aux accidents sans fusion du cœur seront respectés.

6. SYNTÈSE DE L'EFFET DES ÉVOLUTIONS DE CONCEPTION DE L'EPR2 SUR LA DÉMONSTRATION DE SÛRETÉ

Le modèle de réacteur EPR2 constituant une évolution par rapport au modèle EPR, il est logique de chercher à évaluer l'effet des modifications en termes de conception et de conduite apportées sur l'EPR2 sur les études de la démonstration de sûreté. Toutefois, environ une décennie sépare l'expertise des études de sûreté de l'EPR (associée à la demande de mise en service) de celle des études de l'EPR2. Les évolutions de méthodes, en complément des évolutions de conception, complexifient la comparaison.

Tenant compte de ces précautions, certaines évolutions entre les modèles EPR et EPR2 sont *a priori* défavorables du point de vue de la sûreté, comme par exemple l'augmentation de la puissance de la chaudière. **Toutefois, ces évolutions ne mettent pas en cause la démonstration de sûreté de l'EPR2 au stade de la DAC, qui inclut en particulier les principales études contribuant au dimensionnement des systèmes de protection et de sauvegarde.** En effet, en compensation de ces effets défavorables, la gestion prévisionnelle de combustible présente des améliorations de certaines données neutroniques, dégageant des marges. Par ailleurs, des améliorations notables par rapport à l'EPR, notamment vis-à-vis de la maîtrise de la réactivité avec l'ajout d'un troisième train RBS, sont à souligner.

Au travers du prisme des études de sûreté, par rapport à la conception d'EPR, l'absence d'un quatrième train pour les systèmes de sauvegarde de l'EPR2 est globalement compensée par l'interdiction de réaliser de la maintenance préventive lorsque le réacteur est en puissance. Cependant, le choix de retenir une architecture à trois trains de sauvegarde, pour une chaudière à quatre boucles, introduit une dissymétrie des circuits, de nature à complexifier la conduite accidentelle.

Enfin, la Direction de l'expertise en sûreté rappelle que des évolutions interviendront au stade de la DMES (l'introduction d'assemblages avec grilles intermédiaires de mélange, l'ajout du double tambour en fond de cuve, un changement d'outils de calcul...), susceptibles d'avoir un effet sur les résultats des études d'accidents.

7. CONCLUSION

La Direction de l'expertise en sûreté souligne l'importance du travail réalisé par EDF dans le cadre de la démonstration de sûreté déterministe de l'EPR2 au stade de la DAC, depuis le dossier d'options de sûreté de l'EPR NM. Elle note également les efforts menés pour prendre en compte le retour d'expérience d'exploitation et les enseignements issus de la conception et du démarrage des premiers EPR.

À l'issue de son expertise, la Direction de l'expertise en sûreté estime acceptables les éléments apportés par EDF pour justifier la suffisance des études sans fusion du cœur transmises au stade de la DAC. Par ailleurs, elle estime que les études transmises démontrent le respect des critères de sûreté, moyennant la réalisation des engagements pris par EDF au cours de la présente expertise.

Toutefois, la Direction de l'expertise en sûreté recommande qu'EDF poursuive ses investigations visant à réduire le risque de découvrir les assemblages de combustible en cas de passage en gavé-ouvert.

Pour le Directeur de l'expertise en sûreté

Frédérique PICHEREAU

Adjoint au Directeur de l'expertise en sûreté

ANNEXE

Recommandation de la Direction de l'expertise en sûreté

La Direction de l'expertise en sûreté recommande qu'EDF poursuive ses investigations visant à réduire le risque de découvrir les assemblages de combustible en cas de passage en gavé-ouvert.