

Fiche pédagogique

Analyse des conséquences de l'anomalie de fabrication du fond et du couvercle de la cuve du réacteur EPR de Flamanville

La cuve du réacteur EPR de Flamanville

Composant contenant le cœur du réacteur nucléaire (où se produit la réaction en chaîne produisant de la chaleur), la cuve participe au confinement de la radioactivité. Son intégrité est essentielle.

La cuve est en acier et revêtue d'une « peau » en acier inoxydable. Elle est munie d'un couvercle qui est enlevé pour les opérations de renouvellement du combustible. En fonctionnement normal, la cuve du réacteur est remplie d'eau maintenue à une pression de 155 bar et à une température de l'ordre de 300 °C.

La cuve fait partie du circuit primaire qui permet l'évacuation de la chaleur produite par le cœur grâce à une circulation d'eau dans des boucles de refroidissement. Le circuit primaire constitue la deuxième barrière de confinement de la radioactivité, la première étant constituée des gaines des assemblages de combustible et la troisième de l'enceinte de confinement et ses extensions.

La cuve fait partie des équipements dits « en exclusion de rupture ». Cela signifie que sa défaillance et sa rupture ne sont pas postulées dans la démonstration de sûreté.

En conséquence, sa conception, sa fabrication et son suivi en service font l'objet de dispositions de contrôle particulièrement exigeantes afin d'écartier le risque de rupture (règles de conception spécifiques, procédés de fabrication et de contrôle permettant de démontrer l'obtention d'un très haut niveau de qualité de fabrication, contrôles non destructifs renforcés en service...).

La cuve du réacteur de l'EPR Flamanville présente des spécificités par rapport aux cuves des autres réacteurs en fonctionnement en France. Les principales évolutions apportées à sa conception sont les suivantes :

- dimensions plus importantes du fait de l'augmentation de nombre d'assemblages de combustible (241 contre 205 sur les réacteurs de 1450 MWe) ;
- suppression des traversées de fond de cuve afin d'éliminer le risque de fuite ou de brèche associé ; l'ensemble de l'instrumentation pénètre par le couvercle qui comporte de fait un nombre plus important de traversées (107 contre 78 pour les réacteurs de 1450 MWe) ;



Schéma de la cuve de l'EPR

- limitation du nombre de soudures : virole porte-tubulures et bride de cuve (pièces élémentaires composant la cuve) ont été fabriquées en une seule pièce monobloc ;
- conception facilitant l'inspection en service et permettant le suivi de l'irradiation sur 60 ans, durée de fonctionnement prévue pour l'installation.

Découverte de l'anomalie sur le couvercle et le fond de la cuve de l'EPR Flamanville

Dans le cadre de la qualification technique requise au titre de l'arrêté ESPN (réglementation applicable aux équipements sous pression nucléaires) du 12 décembre 2005, Areva a réalisé des essais mécaniques et des mesures de carbone sur une calotte (pièce de forme semi-sphérique) similaire à celle du réacteur EPR de Flamanville, initialement destinée à un projet EPR aux Etats-Unis. Cette qualification technique vise à **assurer que les composants fabriqués dans les conditions et selon les modalités de la qualification auront les caractéristiques requises.**

Les résultats obtenus fin 2014 ont révélé la présence, dans l'acier des calottes utilisées pour fabriquer le couvercle et le fond de la cuve de ce réacteur, d'une zone présentant une concentration de carbone excessive (teneur atteignant localement 0,32 % pour une teneur attendue d'au maximum 0,22 %), et des valeurs de résilience (indicateur de la capacité d'un matériau à résister à une rupture) inférieures aux critères fixés dans l'arrêté.

↳ L'arrêté ESPN :

L'arrêté relatif aux équipements sous pression nucléaires, dit « arrêté ESPN », définit les exigences à respecter lors de la conception, de la fabrication et du suivi en service des équipements sous pression nucléaires.

Cet arrêté comporte des exigences en matière de prévention du risque d'hétérogénéité des pièces.

Les dimensions importantes du couvercle et du fond de la cuve de l'EPR ont conduit à faire évoluer le procédé de fabrication des pièces par rapport à la pratique antérieure, en utilisant notamment un lingot d'acier de masse plus élevée. L'excès de carbone dans l'acier résulte de l'utilisation d'une technique de forgeage à partir d'un lingot dit « conventionnel », de fort tonnage, pour laquelle toutes les précautions n'ont pas été prises afin d'éliminer les parties en excès de carbone (à savoir les zones dites « de *ségrégation majeure positive du carbone* » ou « *zones ségréguées* » dans le lingot).

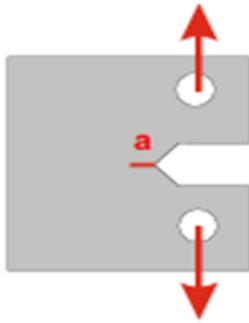
↳ Le forgeage :

Le forgeage est une technique permettant d'obtenir une pièce mécanique en appliquant une force importante sur un lingot de métal, à froid ou à chaud, afin de la contraindre à épouser la forme voulue.

Lors de la coulée du lingot, le refroidissement n'est ni immédiat ni homogène dans la pièce. Le lingot présente donc des propriétés chimiques et mécaniques hétérogènes, entre les bords du lingot et le centre, ainsi qu'entre le haut et le bas. Dans le cas présent, la tête du lingot présente des concentrations plus importantes que le reste de la pièce en éléments tels que le carbone, ce qui peut, pour certains niveaux de concentration, dégrader les propriétés mécaniques de l'acier.

Si elle est identifiée, l'hétérogénéité d'une pièce peut être limitée voire éliminée par les opérations d'usinage.

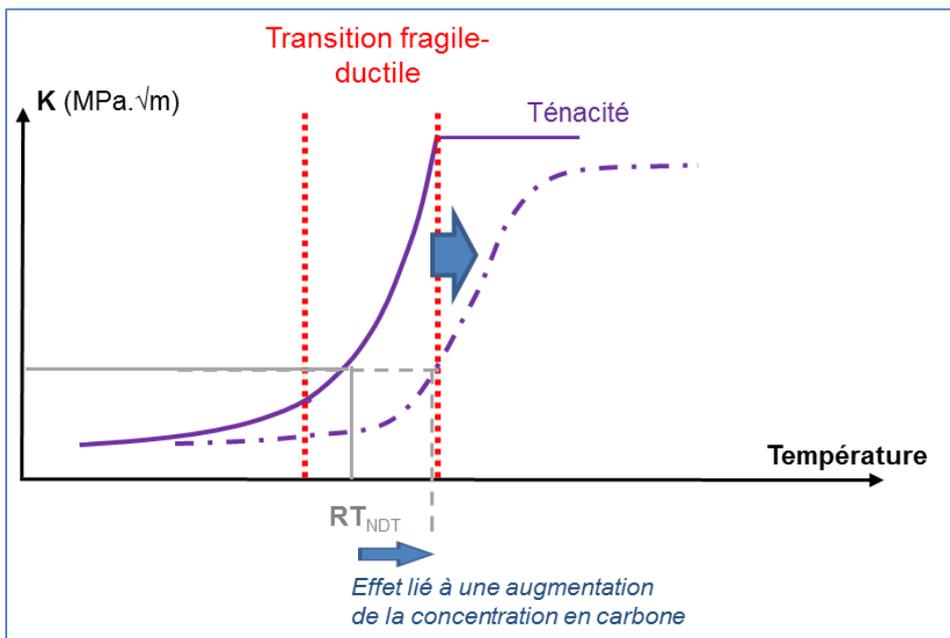
De fortes concentrations en carbone dans une pièce ont pour conséquence une diminution des propriétés de ténacité de l'acier, c'est-à-dire de la capacité du matériau à résister à la propagation d'une fissure en cas de défaut préexistant. La ténacité d'un matériau peut être mesurée sur des échantillons (appelés *éprouvettes*) et correspond à la force ou la quantité d'énergie qu'un matériau peut absorber avant de se fissurer et de rompre.



Dans le schéma ci-contre, la fissure *a* est symbolisée par le trait plein rouge. Les flèches vers le haut et vers le bas représentent les forces à l'œuvre sur l'éprouvette.

Typiquement, il est constaté une fragilisation de l'acier dans les zones à forte concentration en carbone, se traduisant par une diminution de la ténacité et par une augmentation de la température de transition dénommée « RTndt », entre les comportements fragile et ductile du matériau (la ductilité d'un matériau désigne sa capacité à s'étirer, se déformer avant de rompre ; à l'inverse, un matériau fragile va casser et se rompre rapidement).

À titre d'illustration, la ténacité varie en fonction de la température du matériau comme représenté sur la figure ci-dessous :



Démarche d'expertise de l'anomalie sur le couvercle et le fond de la cuve de l'EPR Flamanville

Compte tenu de l'évolution des propriétés mécaniques de l'acier dans les zones à forte concentration en carbone, Areva NP a proposé, en 2015, une démarche de justification de la résistance mécanique du couvercle et du fond de cuve au regard du risque de rupture brutale résultant des conditions de fonctionnement normales et accidentelles.

Cette démarche vise à démontrer que le risque de rupture brutale peut être considéré comme exclu. Ce risque existe lorsqu'il y a présence concomitante :

- ▶ d'un défaut technologique nocif (défini par sa position, son orientation et ses dimensions) ;
- ▶ d'un matériau insuffisamment tenace ;
- ▶ d'une sollicitation (on parle également de *chargement*) mécanique ou thermique important.

La démarche de justification à l'égard du risque de rupture brutale proposée par Areva NP repose ainsi sur :

- ▶ la vérification de l'absence de défaut nocif dans le couvercle et le fond de la cuve de l'EPR de Flamanville ;
- ▶ un **programme d'essais** réalisés sur des éprouvettes prélevées dans des pièces issues du même procédé de fabrication (calottes sacrificielles)¹, afin d'estimer les propriétés mécaniques (principalement la ténacité) des zones à forte concentration en carbone ;
- ▶ le **calcul des contraintes maximales** induites par les chargements en pression et en température dans les calottes de la cuve résultant des conditions de fonctionnement normales ou accidentelles du réacteur. Les situations de fonctionnement accidentelles considérées tiennent compte notamment des chocs thermiques (choc chaud ou choc froid). Ces calculs sont réalisés par des logiciels de simulation des phénomènes thermohydrauliques, thermiques et mécaniques ;
- ▶ la **vérification que les efforts dans les calottes dans les conditions de fonctionnement normales et accidentelles restent en deçà d'un seuil/limite** (ténacité limite) qui conduirait à la propagation d'un défaut postulé et de montrer ainsi la résistance mécanique des calottes.

Cette démarche a fait l'objet d'une instruction conjointe de l'ASN/DEP (expertise de la fabrication des équipements sous pression au sein de l'ASN) et de l'IRSN, formalisée par un rapport commun², et d'un examen par le groupe permanent d'experts pour les équipements sous pression nucléaires (GP ESPN) le 30 septembre 2015, sur la base de ce rapport. **A l'issue de ces examens, l'ASN a pris position en considérant acceptable, dans son principe, la démarche proposée par Areva NP, sous réserve de demandes à prendre en compte lors sa mise en œuvre.** Sur la base des premiers résultats d'essais, Areva NP a fait évoluer sa démarche et complété le programme d'essais. Ces évolutions ont fait l'objet d'une présentation au GP ESPN le 24 juin 2016 et ont conduit l'ASN à émettre des demandes complémentaires.

Areva NP a transmis en décembre 2016 le dossier d'analyse des conséquences de l'anomalie du couvercle et du fond de la cuve du réacteur EPR de Flamanville sur leur aptitude au service. Ce dossier a fait l'objet d'une instruction conjointe ASN/DEP et IRSN afin de se positionner sur l'aptitude au service de ces composants.

Ce dossier d'analyse comporte :

- les **résultats des contrôles non destructifs** réalisés sur le fond et le couvercle de la cuve du réacteur EPR de Flamanville ;

¹ Des essais destructifs ne sont pas réalisables sur le couvercle et le fond de la cuve du réacteur EPR de Flamanville, puisqu'ils conduiraient à les rendre inutilisables. Les essais destructifs du programme ont donc été conduits sur des échantillons prélevés dans trois pièces sacrificielles, les calottes supérieures initialement prévues pour les projets EPR aux États-Unis et en Grande-Bretagne, et la calotte inférieure prévue pour le projet EPR aux États-Unis.

² Cf. [Rapport commun ASN DEP-2015-037971 - IRSN-2015-00010 du 30 septembre 2015](#)

- les résultats du programme d'essais mené sur les différentes calottes sacrificielles (notamment les propriétés de résistance minimale à la rupture) ;
- l'analyse de la représentativité des calottes sacrificielles utilisées pour les essais par rapport à celles de l'EPR de Flamanville ;
- l'évaluation des contraintes maximales induites par les chargements en pression et en température dans les calottes de la cuve résultant des conditions de fonctionnement normales ou accidentelles nécessaires pour l'analyse du risque de rupture brutale du fond et du couvercle de la cuve du réacteur EPR de Flamanville.

Conclusions de l'expertise

Les conclusions de l'analyse par l'ASN DEP et l'IRSN sont détaillées ci-dessous.

Vérification de l'absence de défaut nocif dans les calottes de l'EPR de Flamanville

Les résultats des contrôles réalisés lors de la fabrication du fond et du couvercle de la cuve du réacteur EPR de Flamanville n'avaient pas mis en évidence de défaut de dimensions dépassant les critères des spécifications techniques. A la demande de l'ASN, Areva NP a réalisé des contrôles complémentaires ; ces contrôles ont permis de vérifier l'absence de défaut nocif. Il a par ailleurs été vérifié que la taille des défauts postulés dans les analyses de mécanique d'Areva NP a été définie de manière cohérente avec les performances de ces contrôles³.

Caractérisation des propriétés mécaniques du matériau

Le programme d'essais réalisé par Areva NP sur des calottes sacrificielles (fabriqués selon un procédé identique à celui utilisé pour le fond et le couvercle de la cuve du réacteur EPR de Flamanville) a permis de caractériser les propriétés mécaniques du matériau en zone ségréguée. Au total, 1700 essais mécaniques ont été réalisés, complétés par environ 1500 analyses chimiques pour caractériser l'étendue des zones ségréguées et les propriétés mécaniques du matériau.

Il ressort de l'analyse que :

- ▶ les différences dans l'élaboration des différentes calottes conduisent à des variations sur les propriétés mécaniques qu'il est difficile d'évaluer précisément mais qui restent limitées. Ainsi, l'appréciation des propriétés du matériau doit se faire selon une démarche prudente ;
- ▶ la présence d'une ségrégation résiduelle du carbone est bien à l'origine de la modification des propriétés mécaniques. Le comportement observé reste toutefois celui attendu pour ce type d'acier (acier ferritique), utilisé pour la fabrication de l'ensemble des cuves des réacteurs en fonctionnement. La modification des propriétés mécaniques se traduit principalement par une augmentation de la température de transition entre le comportement fragile du matériau et son comportement ductile, de l'ordre d'une dizaine à quelques dizaines de degrés. En conséquence, le fait qu'Areva NP retienne une ténacité cohérente avec l'augmentation de la température de transition constatée à l'issue des essais réalisés est satisfaisant. EDF s'est par ailleurs engagé à réaliser un programme

³ Il s'agit de s'assurer que les défauts étudiés sont plus grands que les défauts qui pourraient rester dans la pièce après les contrôles, car trop petits pour être vus. Plus le défaut est grand, plus il est susceptible de s'amorcer : étudier un défaut plus grand que ceux qui pourraient rester dans la pièce est une garantie de sécurité.

d'essais afin de conforter les hypothèses retenues pour tenir compte du vieillissement thermique du matériau, ce qui est satisfaisant.

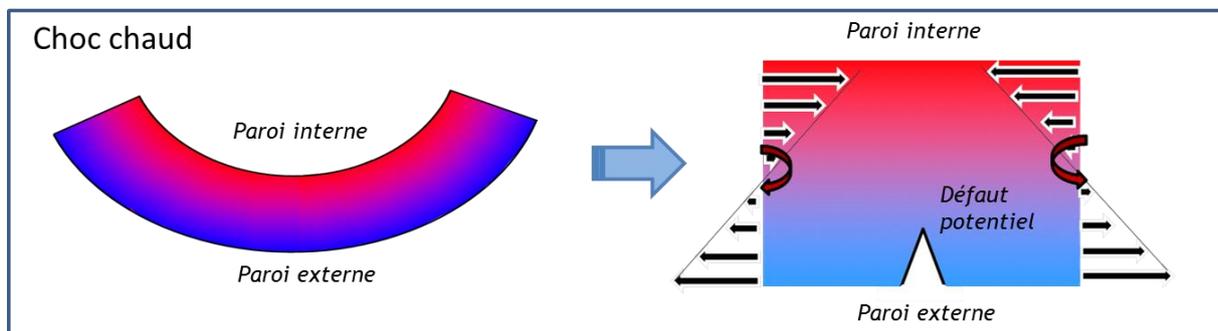
Evaluation des chargements thermomécaniques

Les conditions de pression, de température et de débit dans le circuit primaire sont variables selon les modes de fonctionnement du réacteur. Ces modes de fonctionnement peuvent être des régimes permanents ou transitoires, prévus au titre de la conduite normale, ou résulter d'événements fortuits qui peuvent affecter l'installation (incidents ou accidents). Ils constituent des situations qui se caractérisent par des conditions thermohydrauliques (température, débit, pression) de l'eau du circuit primaire qui varient en fonction du temps et qui conduisent à des chargements thermomécaniques sur les structures, dont le couvercle et le fond de la cuve.

Les situations les plus sévères à considérer pour l'évaluation du risque de propagation d'une fissure sont les situations conduisant à l'ouverture de défauts potentiels ; elles dépendent de la localisation de ce défaut dans le composant. Areva NP a ainsi identifié les situations conduisant à un choc thermique sur les calottes de la cuve : un choc chaud résulte de la mise en contact d'eau chaude avec une paroi froide et un choc froid, de la mise en contact d'eau froide avec une paroi chaude.

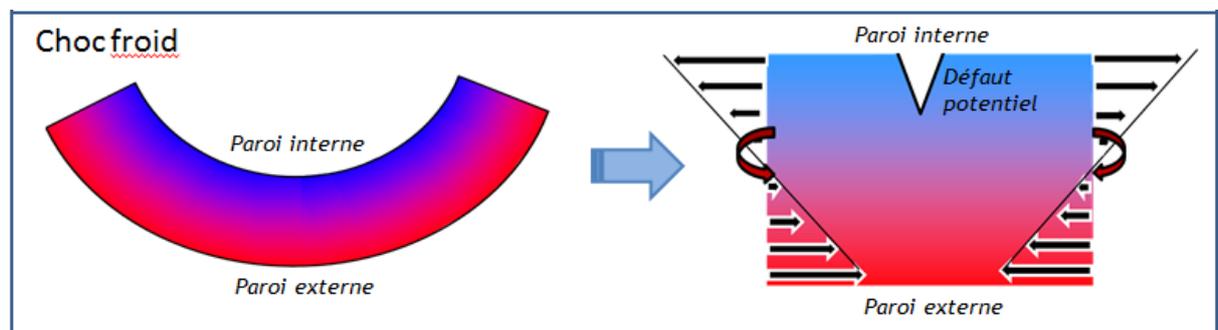
Les chocs thermiques peuvent conduire, en présence d'une zone de ségrégation majeure résiduelle positive, à ouvrir mécaniquement un éventuel défaut, et donc à entraîner un risque de rupture brutale sous l'effet du chargement thermomécanique :

- ▶ en cas du choc chaud, les contraintes thermiques en paroi externe tendent à ouvrir le défaut potentiel situé en paroi externe. Pour ce type de sollicitation, un défaut potentiel situé en peau interne ne peut s'ouvrir car les contraintes tendent à le refermer ;



Répartition de la température dans la paroi du fond de la cuve en cas de choc chaud, et répartition des efforts induits dans la paroi.

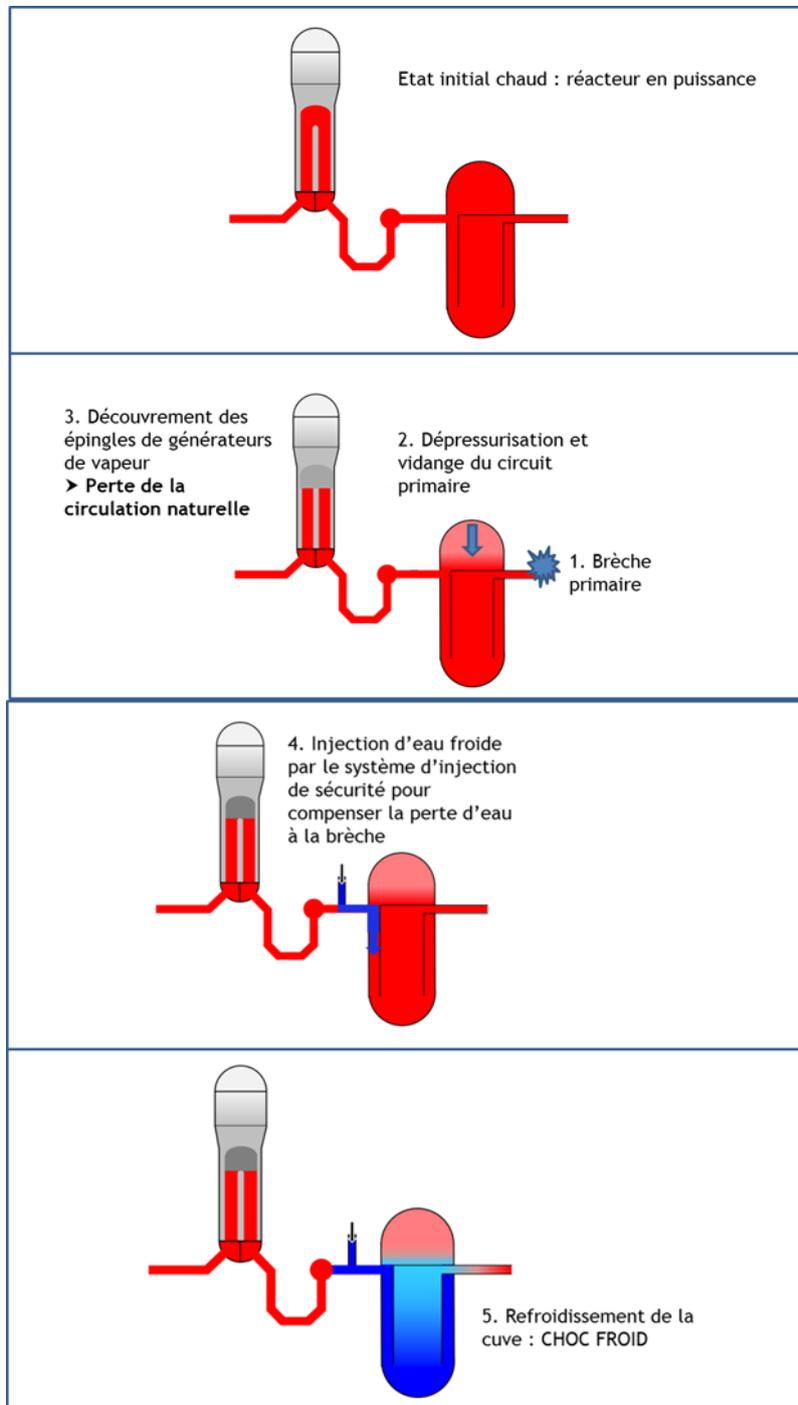
- ▶ de manière symétrique, en cas de choc froid, un défaut potentiel situé en peau interne du fond de cuve tendrait à s'ouvrir alors qu'en peau externe il tendrait à se refermer.



Répartition de la température dans la paroi du fond de la cuve de l'EPR en cas de choc froid ainsi que la répartition des efforts induits dans la paroi.

Les situations utilisées pour définir les chargements thermomécaniques s'appliquant au couvercle et au fond de la cuve ont été examinées et analysées par l'IRSN, en considérant à chaque fois les situations de choc chaud et de choc froid. L'analyse a porté sur l'exhaustivité des situations considérées par Areva NP ainsi que sur leur caractérisation.

À titre d'illustration, le schéma ci-dessous présente le cas d'une brèche sur le circuit primaire étudiée par Areva NP dans le cadre de ce dossier, qui entraîne un choc froid sur le fond de la cuve.



Les nombreux échanges tenus au cours de l'instruction sur l'exhaustivité des situations à considérer et leur caractérisation (pression, température, débit) ont amené Areva NP à compléter son dossier initial et à consolider sa démonstration. **La démarche adoptée par Areva NP pour identifier les situations à l'origine des sollicitations les plus sévères du couvercle et du fond de la cuve est au final jugée satisfaisante, de même que le caractère conservatif des chargements qui ont pu en être déduits.**

Evaluation du risque de rupture brutale

L'évaluation du risque de rupture brutale réalisée pour le fond et le couvercle de la cuve du réacteur EPR de Flamanville est cohérente avec la démarche prescrite par le code définissant les règles de conception et de construction des matériels mécaniques des îlots nucléaires (RCC-M), tant par le choix des défauts analysés, que par la définition de la ténacité minimale et l'évaluation des facteurs d'intensité de contraintes. Les marges obtenues, tout en étant plus faibles que celles qui seraient obtenues pour un matériau exempt de ségrégation positive de carbone, restent en effet supérieures aux critères de conception.

Les conclusions de cette analyse montrent que les propriétés mécaniques du matériau en zone ségréguée sont suffisantes pour prévenir le risque de rupture brutale.

Suivi en service

Les défaillances constatées sur les processus de qualification technique, l'utilisation d'un procédé de fabrication ne permettant pas de s'affranchir des risques liés à la ségrégation résiduelle en carbone et la réduction des marges pour le risque redouté de rupture brutale traduisent le fait que le premier niveau de défense en profondeur⁴ est affecté.

La démarche de justification d'Areva NP, si elle permet de démontrer la suffisance des marges, ne permet pas, seule, de restaurer l'ensemble des garanties que doit apporter ce premier niveau de défense en profondeur. En effet, le procédé de fabrication devrait être au meilleur niveau technologique s'agissant d'un équipement (la cuve) dont la défaillance n'est pas postulée dans la démonstration de sûreté du réacteur (démarche dite d'exclusion de rupture).

Aussi, la démarche de justification proposée par Areva NP nécessite d'être complétée par des dispositions de suivi en service du fond et du couvercle de la cuve afin de renforcer la défense en profondeur d'une manière générale.

L'ASN/DEP et l'IRSN considèrent que les contrôles en service du fond et du couvercle prévus par EDF devraient être adaptés de manière à vérifier l'absence de défaut au cours de l'exploitation de l'installation, l'installation ayant été conçue par EDF et Areva NP pour une durée d'exploitation de 60 ans.

Si la faisabilité de tels contrôles apparaît acquise pour le fond de la cuve, celle-ci reste à établir pour le couvercle, compte tenu des nombreuses pénétrations utilisées pour les mécanismes de commande des grappes (utilisées pour le contrôle de la réactivité), l'instrumentation du cœur et le tube d'évent. **En cas d'impossibilité de réaliser des contrôles ayant des performances**

⁴ Le principe de défense en profondeur est le principe fondamental de conception des réacteurs nucléaires. Il consiste à mettre en œuvre différents niveaux de défense successifs (caractéristiques intrinsèques, dispositions matérielles et procédures), destinés à prévenir les incidents et accidents et, en cas d'échec de la prévention, à en limiter les conséquences.

suffisantes, EDF s'est engagée à changer le couvercle de cuve lors de la première visite décennale du réacteur qui devrait intervenir un peu plus de 10 ans après sa mise en service.

L'ASN/DEP et l'IRSN considèrent que l'anomalie ne remet pas en cause l'aptitude au service du fond de la cuve sous réserve que les contrôles du fond de la cuve prévus par EDF soient adaptés pour mieux détecter les défauts potentiels. Ils estiment que ces contrôles, anticipés par rapport à la première visite décennale et auxquels ces adaptations seraient apportées, sont de nature à renforcer significativement le deuxième niveau de défense en profondeur.

De la même manière que pour le fond de cuve, l'ASN/DEP et l'IRSN considèrent que des contrôles du couvercle de la cuve sont indispensables afin de renforcer le deuxième niveau de défense en profondeur et vérifier durant toute la période de fonctionnement du réacteur qu'aucun défaut n'est présent dans la zone ségréguée. Ces contrôles sont d'autant plus nécessaires que le couvercle présente des singularités géométriques liées aux adaptateurs et des conditions d'exploitation différentes de celles du fond (températures, manipulations du couvercle, etc.). Aussi, l'ASN/DEP et l'IRSN considèrent que l'utilisation du couvercle de la cuve du réacteur EPR de Flamanville ne saurait être envisagée au-delà de quelques années de fonctionnement sans que les contrôles nécessaires au renforcement du deuxième niveau de défense en profondeur n'aient été mis en œuvre.