

**Note de synthèse
au Groupe permanent d'experts
pour les équipements sous pression nucléaires**

CODEP-DEP-2016-019209

Rapport IRSN/2016-00005



Séance du 24 juin 2016



**Démarche proposée par AREVA pour justifier de la
ténacité suffisante des calottes du fond et du couvercle
de la cuve de l'EPR de Flamanville 3**

Point d'étape

Date	Le directeur des équipements sous pression nucléaires de l'ASN	La directrice des systèmes, des nouveaux réacteurs et des démarches de sûreté de l'IRSN
17/06/2016	 R. CATTEAU	 S. CADET-MERCIER

SOMMAIRE

RÉFÉRENCES.....	3
1. INTRODUCTION.....	4
2. ÉVOLUTIONS DEPUIS LE GP ESPN DU 30 SEPTEMBRE 2015.....	6
2.1. Démarche présentée lors du GP ESPN du 30 septembre 2015	6
2.2. Demandes de la lettre de position du GP ESPN	6
2.3. Mise en œuvre du programme expérimental	7
2.4. État des lieux depuis début 2016.....	7
2.4.1. Résultats des essais de résilience sur la calotte supérieure UA.....	7
2.4.2. Incertitudes des méthodes de mesure de la teneur en carbone	8
2.4.3. Résultats des mesures de la teneur en carbone dans les pièces investiguées	10
2.5. Avancement de l’instruction du dossier relatif aux situations et charges	10
3. ÉVOLUTIONS DE LA DÉMARCHE DE JUSTIFICATION.....	11
3.1. Impact des résultats des essais de résilience sur la calotte supérieure UA.....	11
3.2. Impact des résultats des mesures de la teneur en carbone sur les pièces sacrificielles	11
ANNEXE 1 : Demandes de la lettre de position de l’ASN du 14 décembre 2015	
ANNEXE 2 : Répartition des essais par laboratoire	
ANNEXE 3 : Synthèse des cartographies de teneur en carbone par profondeur	
ANNEXE 4 : Synthèse des cartographies de teneur en carbone dans l’épaisseur	
ANNEXE 5 : Architecture documentaire du dossier final de justification d’AREVA	
ANNEXE 6 : Lettre de position de l’ASN du 14 décembre 2015	

Références

- [1] Arrêté du 12 décembre 2005 relatif aux équipements sous pression nucléaires (dit « arrêté ESPN »)
- [2] Rapport ASN/IRSN référencé CODEP-DEP-2015-037971 - IRSN/2015-00010 - Rapport au Groupe permanent d'experts pour les équipements sous pression nucléaire du 30 septembre 2015 - Analyse de la démarche proposée par AREVA pour justifier de la ténacité suffisante des calottes du fond et du couvercle de la cuve de l'EPR de Flamanville 3
- [3] Avis et recommandations du GP ESPN du 30 septembre 2015 référencé CODEP-MEA-2015-040055 du 1^{er} octobre 2015
- [4] Courrier de l'ASN à AREVA référencé CODEP-DEP-2015-043888 du 14 décembre 2015 – Position de l'ASN sur la démarche de justification de la ténacité suffisante des calottes du fond et du couvercle de la cuve de l'EPR de Flamanville 3
- [5] Courrier d'AREVA à l'ASN référencé ARV-DEP-00461 du 07 avril 2016 – FA3 calottes de cuve – programme d'essais complémentaires sur la calotte UA supérieure
- [6] Note AREVA référencée D02-PEEM-F-16-0260 révision A du 20 mai 2016 – Méthodologie générale permettant la démonstration de satisfaction des critères mécaniques pour les calottes de cuve FA3

1. Introduction

Dans le cadre de la qualification technique des calottes du fond et du couvercle de la cuve de l'EPR de Flamanville 3, l'obtention de valeurs de résilience inférieures aux critères fixés par le point 4 de l'annexe 1 de l'arrêté en référence [1] a amené AREVA en 2015 à proposer à l'ASN une démarche destinée à justifier le caractère suffisant de la ténacité du matériau de ces composants.

Cette démarche a fait l'objet d'une instruction de l'ASN et de l'IRSN formalisée par le rapport en référence [2] et d'un examen par le groupe permanent d'experts pour les équipements sous pression nucléaires (GP ESPN) le 30 septembre 2015 qui a rendu un avis en référence [3] sur les points suivants :

- l'acceptabilité, sur le principe, d'une démarche visant à justifier du caractère suffisant de la ténacité des calottes de fond et du couvercle de la cuve de l'EPR de Flamanville 3 ;
- la notion de ténacité suffisante du matériau proposée par AREVA et sa méthode de détermination ;
- la méthode de détermination de la ténacité minimale du matériau qui repose notamment sur un programme d'essais, en particulier sur la transposabilité aux calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville 3 des résultats obtenus sur d'autres calottes ;
- la démarche de comparaison de la ténacité minimale du matériau et de la ténacité suffisante, notamment les critères associés.

Sur la base de cette instruction et de cet avis, l'ASN a pris position sur cette démarche et a fait part de ses demandes dans la lettre du 14 décembre 2015 en référence [4] envoyée à AREVA. Cette lettre figure en annexe 6 au présent rapport.

Sous réserve de la prise en compte de ses observations et de ses demandes, l'ASN a indiqué à AREVA qu'elle considère que la démarche de justification est appropriée pour autant que le phénomène en cause soit identifié et expliqué et que la connaissance des propriétés mécaniques soit suffisante. Cette démarche reposait sur un programme expérimental réalisé sur deux calottes sacrificielles (calottes supérieure UK et inférieure UA).

De plus, l'ASN a souligné que cette démarche de justification repose sur l'hypothèse de propriétés mécaniques satisfaisantes à mi-épaisseur, notamment en matière de résilience, et que dans le cas où cette hypothèse ne serait pas confirmée par les résultats des essais réalisés sur les calottes sacrificielles, le dossier de justification devrait être revu.

Les premiers résultats des essais ont amené AREVA, début avril 2016, à faire évoluer sa démarche de justification sur quatre points :

- l'extension du programme d'essais à une troisième calotte sacrificielle (calotte supérieure UA) ;
- l'extension des essais jusqu'au trois quarts de l'épaisseur des calottes sacrificielles inférieure et supérieure UA ;
- les situations et charges à prendre en compte dans la démarche de justification ;
- la justification de la représentativité des calottes sacrificielles par rapport à celles de la cuve du réacteur EPR de Flamanville 3.

L'objet de cette note est de :

- présenter l'avancement du dossier depuis la séance du GP ESPN du 30 septembre 2015 ;

- présenter les évolutions qu'AREVA propose d'apporter à sa démarche de justification ainsi que leurs motivations.

Elle n'a pas pour but de présenter les résultats de l'instruction de l'IRSN et de l'ASN qui est en cours, ni de prendre position sur les évolutions de la démarche proposée par AREVA.

2. Évolutions depuis le GP ESPN du 30 septembre 2015

2.1. Démarche présentée lors du GP ESPN du 30 septembre 2015

La démarche proposée par AREVA est axée sur l'évaluation du risque de rupture brutale et comprend trois étapes principales :

1. la détermination (par calculs) d'une ténacité suffisante pour prévenir le risque de rupture brutale (ou de manière équivalente une température de transition fragile ductile RT_{NDT}^1 maximale admissible) ;
2. l'évaluation (par essais) de la ténacité minimale dans la zone de ségrégation majeure positive du matériau (ou de manière équivalente une RT_{NDT} en zone ségrégée) ;
3. la comparaison de la ténacité minimale du matériau à la ténacité suffisante (ou de la RT_{NDT} de la zone ségrégée à la RT_{NDT} maximale admissible).

Cette démarche est schématisée sur la Figure 1.

2.2. Demandes de la lettre de position du GP ESPN

La lettre de l'ASN en référence [4], qui faisait suite à l'avis du GP ESPN du 30 septembre 2015, comporte 15 demandes qui se rapportent soit à la détermination par le calcul des propriétés admissibles du matériau (en orange sur la Figure 1), soit à la détermination expérimentale des propriétés mécaniques en zone ségrégée (ZS, en bleu), soit à leur comparaison (en vert).

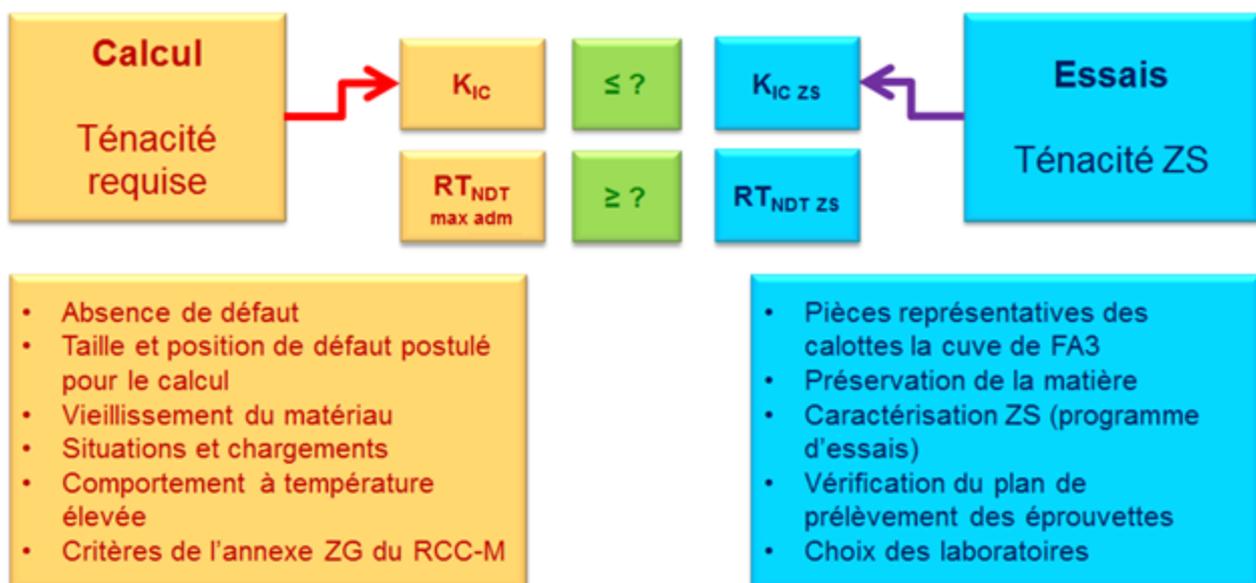


Figure 1 : démarche de justification et objets des demandes de la lettre en référence [4].
ZS : zone ségrégée

Des demandes complémentaires relatives à la possibilité de remplacer les calottes ont également été formulées.

¹ Le RCC-M définit la RT_{NDT} comme la température qui, augmentée de 33°C, correspond à une valeur d'au moins 68 J à l'essai de flexion par choc (Charpy).

Le tableau en annexe 1 reprend les 15 demandes de la lettre en référence [4], ainsi que l'état d'avancement des réponses apportées par AREVA. Cette lettre figure en annexe 6 au présent rapport.

2.3. Mise en œuvre du programme expérimental

La caractérisation des zones ségréguées de chaque calotte investiguée s'est poursuivie fin 2015, et les essais mécaniques ont débuté en 2016 dans plusieurs laboratoires, selon la répartition décrite en annexe 2.

AREVA procède actuellement à la caractérisation de la zone ségréguée de la calotte supérieure UK. Les essais doivent s'achever très prochainement dans le laboratoire du centre technique d'AREVA à Erlangen en Allemagne. AREVA débute par ailleurs la mise en œuvre du plan de prélèvement des éprouvettes en zone ségréguée de la calotte inférieure UA. Les essais seront réalisés dans le laboratoire du SCK.CEN à Mol en Belgique.

Le dossier présentant les résultats dans la zone ségréguée de la calotte supérieure UK et à mi et quart d'épaisseur dans la zone ségréguée de la calotte inférieure UA sont attendus pour septembre 2016.

AREVA envisage de faire intervenir un troisième laboratoire (processus de sélection en cours) pour la mise en œuvre des essais en zone de recette et aux trois quarts de l'épaisseur de la calotte supérieure UA.

L'ASN a mandaté BUREAU VERITAS pour surveiller la mise en œuvre de l'ensemble du programme expérimental.

2.4. État des lieux depuis début 2016

2.4.1. Résultats des essais de résilience sur la calotte supérieure UA

La calotte supérieure UA, à l'origine de la découverte de l'anomalie en 2014 et du dossier de justification proposé par AREVA, a fait l'objet d'investigations complémentaires début 2016. La totalité de la hauteur d'une carotte prélevée au centre de la calotte a été caractérisée grâce à des mesures de teneur en carbone par prélèvements de copeaux et des essais de résilience (Figure 2).

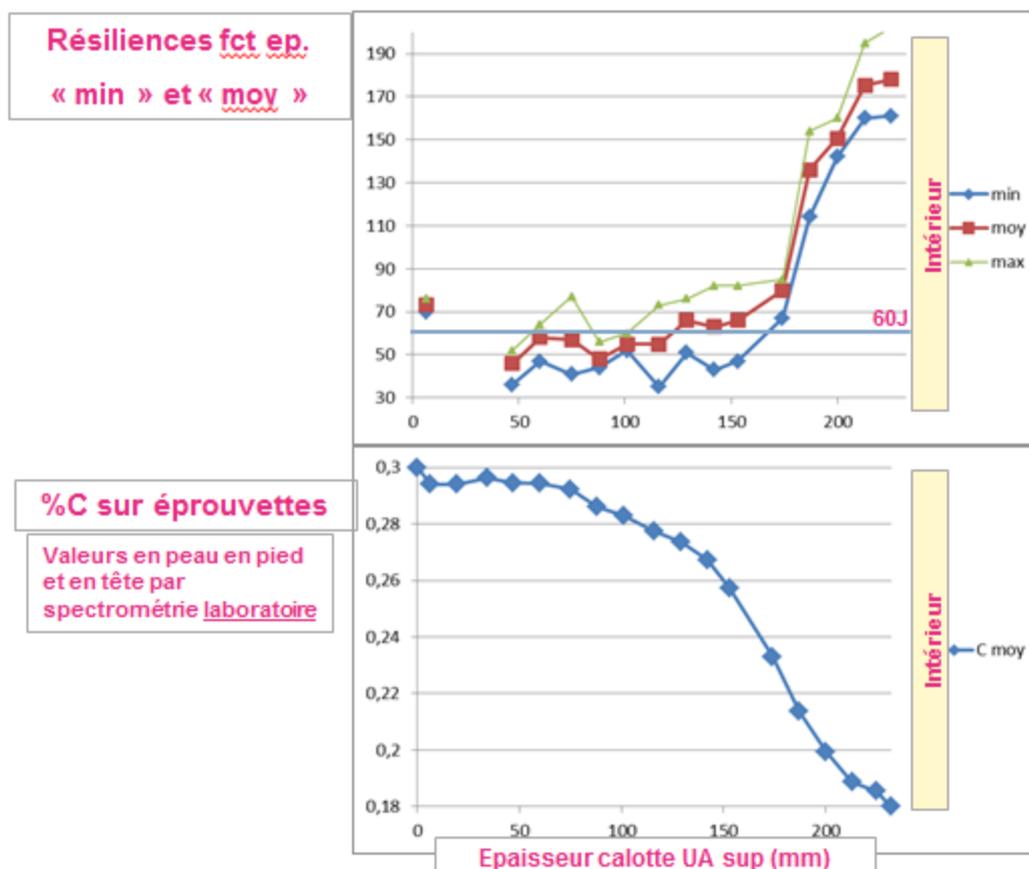


Figure 2 : résilience à 0°C (en J) et teneur en carbone en fonction de la position dans l'épaisseur à partir de la peau externe sur la carotte centrale de la calotte supérieure UA

Il a été constaté à mi-épaisseur sur la carotte centrale de la calotte supérieure UA d'une part que la résilience est inférieure à 60 J à 0°C, et d'autre part que la valeur d'allongement à température ambiante est inférieure à 20 % (allongement de 18,4% obtenu sur éprouvette réduite), ce qui a remis en cause l'hypothèse d'AREVA selon laquelle l'effet de la ségrégation majeure positive en carbone se limite à la demi-épaisseur externe.

En conséquence, AREVA a revu la liste des situations à prendre en compte dans le dossier de justification ainsi que son dossier sur le comportement suffisamment ductile du matériau.

Concernant les situations à prendre en compte, AREVA ne limite plus désormais son analyse aux chocs chauds sollicitant des défauts hypothétiques situés en peau externe, mais considère également les chocs froids sollicitant des défauts hypothétiques positionnés aux trois quarts de l'épaisseur à partir de l'extérieur.

Il est à noter que l'ASN avait demandé à AREVA dans son courrier en référence [4] de vérifier que les propriétés mécaniques de résilience des calottes à partir de la mi-épaisseur vers l'intérieur de la cuve sont supérieures à 60 joules à 0°C.

2.4.2. Incertitudes des méthodes de mesure de la teneur en carbone

Les mesures de teneur en carbone mises en œuvre dans le cadre de la démarche d'AREVA reposent sur deux techniques qui présentent des incertitudes à prendre en considération :

- la spectrométrie d'émission optique par étincelage portative ;
- l'analyse chimique élémentaire par spectroscopie de masse à plasma à couplage inductif sur copeaux.

Pour les mesures par spectrométrie portative, l'incertitude a été évaluée par AREVA à $\pm 15\%$. AREVA souhaite affiner le procédé pour réduire cette incertitude à des valeurs de l'ordre de $\pm 10\%$. En 2015, AREVA avait mentionné une précision de mesure de 4%, obtenue à partir de 3 mesures sur un même point.

Pour ce qui concerne les mesures sur copeaux, l'incertitude a été réévaluée à $\pm 5\%$.

Les conséquences de ces incertitudes sont illustrées sur la Figure 3 qui présente des cartographies réalisées sur la même zone avec les deux méthodes à mi-épaisseur de la calotte supérieure UK. On constate toutefois sur cet exemple que les deux méthodes permettent de positionner la zone ségréguée de façon très similaire.

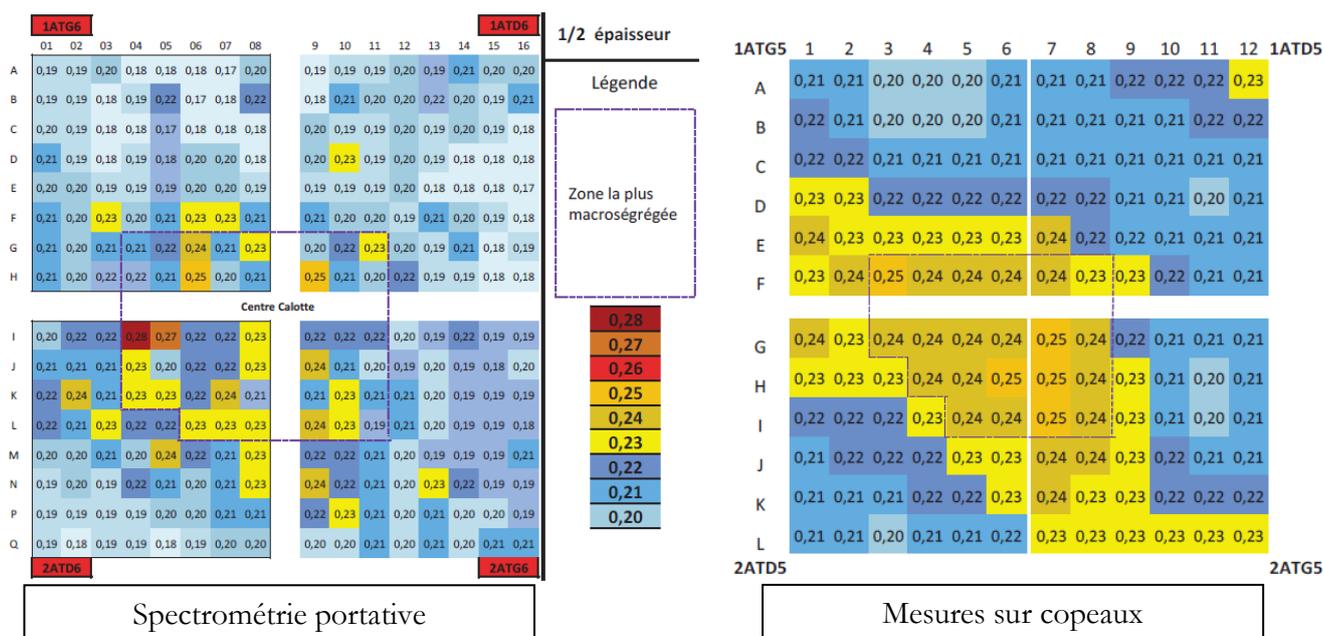


Figure 3 : mesures de teneurs en carbone à mi-épaisseur de la calotte supérieure UK par spectrométrie portative et sur copeaux. Le pas de mesure est différent, mais la taille des blocs est identique.

AREVA travaille actuellement à caractériser et optimiser les incertitudes de ces deux méthodes de mesure.

Les cartographies de teneurs en carbone, obtenues par mesures sur copeaux, à différentes profondeurs dans la zone ségréguée des calottes supérieure UK et inférieure UA, sont présentées en annexe 3 (les cartographies aux différentes profondeurs de la calotte supérieure UA sont en cours de réalisation).

Il est à noter que seules des mesures par spectrométrie portative pourront être réalisées sur les calottes de la cuve de Flamanville 3 car celles-ci ont déjà été usinées aux dimensions finales.

2.4.3. Résultats des mesures de la teneur en carbone dans les pièces investiguées

AREVA a positionné les résultats des mesures des teneurs en carbone dans l'épaisseur de la zone ségréguée des calottes supérieure UK et inférieure UA, ainsi que dans la carotte centrale de la calotte supérieure UA, par rapport à un bloom² de référence, le bloom MOPPEC³.

Les cartographies de teneurs en carbone, obtenues par spectrométrie portative, dans l'épaisseur des calottes supérieure UK, inférieure UA et supérieure UA, sont présentées en annexe 4.

Ces nouveaux résultats ont conduit AREVA à s'interroger sur la représentativité des calottes investiguées vis-à-vis des calottes de cuve du réacteur de Flamanville 3. AREVA a ainsi complété sa démarche afin de préciser les incertitudes sur le positionnement et l'intensité de la ségrégation dans les lingots. Ce point est détaillé au paragraphe 3.2.

2.5. Avancement de l'instruction du dossier relatif aux situations et charges

Le dossier justifiant les situations et charges dimensionnantes initialement présenté par AREVA retenait les initiateurs analysés dans les dossiers de situations et les initiateurs conduisant à des surpressions à froid.

Lors de l'instruction, AREVA a complété son dossier par l'identification de transitoires pouvant induire un choc chaud sur les calottes, en analysant notamment les situations avec une température initiale du métal basse (initiale ou suite à un refroidissement) puis une élévation de la température du fluide lors du transitoire. Ces transitoires ont été étudiés afin d'évaluer les conditions thermohydrauliques enveloppes (pression, température, débit).

Cette démarche a été mise en œuvre pour les calottes inférieure et supérieure. L'instruction des hypothèses retenues pour ces transitoires est en cours. À ce stade, les situations limitatives identifiées correspondent :

- pour la calotte inférieure, à un redémarrage de la circulation naturelle lors d'un transitoire de petite brèche primaire ;
- pour la calotte supérieure, à la perte totale de refroidissement du système de refroidissement du réacteur à l'arrêt (RRA) en état d'arrêt à froid normal.

Par ailleurs, compte tenu des premiers résultats d'essais, AREVA a complété son dossier par l'analyse de transitoires de chocs froids. AREVA a identifié les transitoires limitatifs suivants :

- pour la calotte supérieure, l'ouverture intempestive d'une soupape du pressuriseur ;
- pour la calotte inférieure, la rupture d'un tube de générateur de vapeur.

L'instruction du dossier relatif aux chocs froids a débuté en juin 2016.

² Un bloom est un état intermédiaire de la pièce, entre le lingot (après coulée) et la pièce forgée à l'état final, obtenu après une opération de forgeage visant à lui procurer un diamètre constant sur toute sa hauteur.

³ « MOPPEC » (« Modèle de Prédiction des Propriétés des Pièces Ecrasées ») est un programme de recherche et de développement mené par AREVA entre 2010 et 2015 et fondé sur un bloom sacrificiel dit « bloom MOPPEC », obtenu à partir d'un lingot similaire à celui des calottes de cuve investiguées.

3. Évolutions de la démarche de justification

Les constats présentés dans le chapitre 2 et les demandes de l'ASN présentées au paragraphe 2.2, ont amené AREVA, début avril 2016, à faire évoluer sa démarche de justification sur les points suivants :

- l'ajout d'une troisième calotte sacrificielle ;
- l'extension des essais jusqu'au trois quarts de l'épaisseur des calottes UA ;
- les situations et charges à prendre en compte dans la démarche de justification ;
- la justification de la représentativité, vis-à-vis des calottes de cuve du réacteur EPR de Flamanville 3, des résultats obtenus sur d'autres calottes.

À la demande de l'ASN, AREVA a explicité une partie des évolutions apportées dans le courrier en référence [5] et la note en référence [6], et les a intégrées à l'architecture documentaire du dossier de justification (voir annexe 5).

A ce stade, AREVA doit encore détailler les évolutions qu'il propose, et l'ASN et l'IRSN instruire ces éléments.

3.1. Impact des résultats des essais de résilience sur la calotte supérieure UA

Pour tenir compte des premiers résultats expérimentaux obtenus sur la carotte centrale de la calotte supérieure UA (résiliences et allongements à mi-épaisseur, voir paragraphe 2.4.1), AREVA a proposé :

- d'ajouter la calotte supérieure UA dans le programme d'essais, en définissant un plan de prélèvement aux objectifs similaires à ceux des deux autres calottes sacrificielles (calottes supérieure UK et inférieure UA) ;
- d'étendre les essais jusqu'au trois quarts de l'épaisseur des calottes supérieure et inférieure UA⁴, en réalisant le même plan de prélèvement qu'à la moitié et au quart de l'épaisseur ;
- de fournir un dossier sur la déchirure ductile et de réaliser des essais de traction supplémentaires en zone ségréguée à température ambiante ;
- de compléter le dossier des situations et charges en étudiant les chocs froids avec un défaut aux trois quarts de l'épaisseur.

3.2. Impact des résultats des mesures de la teneur en carbone sur les pièces sacrificielles

Les résultats des mesures de la teneur en carbone sur les calottes sacrificielles constituent des résultats complémentaires éclairant la représentativité des résultats obtenus sur ces calottes par rapport à celles de la cuve du réacteur EPR de Flamanville 3.

Dans ce cadre, AREVA propose de compléter sa démarche de justification en :

- fournissant des compléments visant à mieux préciser les caractéristiques des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville 3 par rapport aux caractéristiques des calottes sacrificielles, notamment en ce qui concerne le positionnement des calottes dans le bloom initial, l'incertitude et la variabilité des ségrégations et les effets de trempe ;
- réalisant de nouvelles mesures de teneur en carbone, par spectrométrie portative, sur les calottes supérieure et inférieure de la cuve de Flamanville 3.

⁴ La calotte supérieure UK n'est pas retenue en raison des teneurs en carbone aux trois quarts de l'épaisseur plus faibles que celles des calottes UA.

En particulier, pour évaluer et justifier la représentativité des calottes investiguées vis-à-vis des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville 3, AREVA introduit la notion de famille de composants. Une famille de composants est caractérisée par :

- des paramètres chimiques cohérents à la coulée ;
- des gammes de fabrication identiques ;
- une étendue de la ségrégation similaire ;
- un positionnement relatif des pièces dans le bloom initial similaire ;
- des teneurs en carbone en surface similaires ;
- un profil de trempe équivalent.

La notion de famille de composant repose sur :

- une caractérisation à partir des essais réalisés dans le cadre du programme MOPPEC ;
- la caractérisation de la variabilité des ségrégations et des sources d'incertitudes ;
- la démonstration que chacune des calottes étudiée est dans cette famille.

La famille des calottes de cuve est ainsi caractérisée par :

- des lingots dont le poids est proche de 157 tonnes, coulés dans une lingotière de type 2550 ;
- des teneurs en carbone à la coulée proches de 0,18 % ;
- des gammes de fabrication analogues conduisant à des taux de ségrégation majeure positive du carbone⁵ reproductibles de l'ordre de 40 % à 65 % dans la pièce finale ;
- des effets de trempe similaires, associés à des usinages réalisés après traitement thermique de qualité de dimensions voisines.

À partir des enregistrements de fabrication, AREVA a reconstitué le positionnement théorique des différentes calottes dans leur bloom, en réévaluant les taux de chute, la perte au feu et les épaisseurs usinées. AREVA a ensuite superposé chaque composant sur la représentation du bloom MOPPEC, en faisant l'hypothèse que ce bloom est représentatif.

Pour évaluer la représentativité des calottes sacrificielles à l'aide de la notion de famille, AREVA a repris les teneurs en carbone caractérisées en 2015 sur le bloom MOPPEC (Figure 4) et a défini une borne inférieure et une borne supérieure en appliquant des coefficients aux taux de ségrégation du programme MOPPEC. La Figure 5 représente le positionnement des calottes de cuve dans cette famille, en intégrant les incertitudes sur la détermination de la teneur en carbone (en ordonnée) et sur le positionnement dans le bloom MOPPEC de référence (en abscisse).

⁵ Pour un acier, la teneur en carbone mesurée à la coulée dans l'acier liquide (C) reflète la composition moyenne en carbone de l'ensemble d'une pièce. La différence avec la teneur locale en carbone mesurée à un endroit de la pièce (ΔC) permet de quantifier le taux de ségrégation majeure positive ($\Delta C/C$).

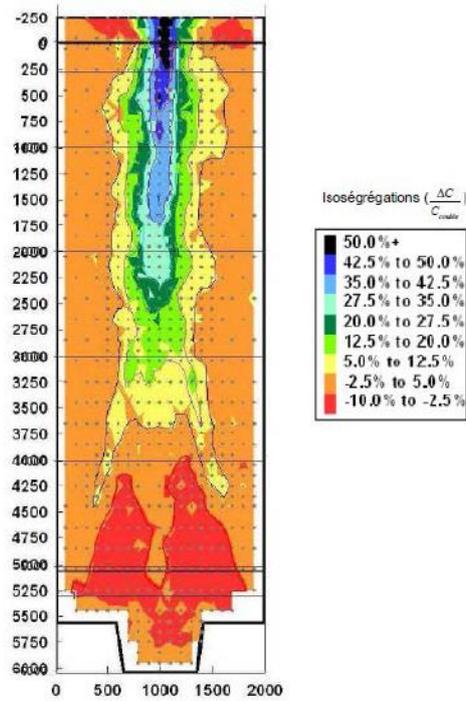


Figure 4 : Représentation graphique interpolée du taux de ségrégation du carbone $\Delta C/C$ du bloom MOPPEC

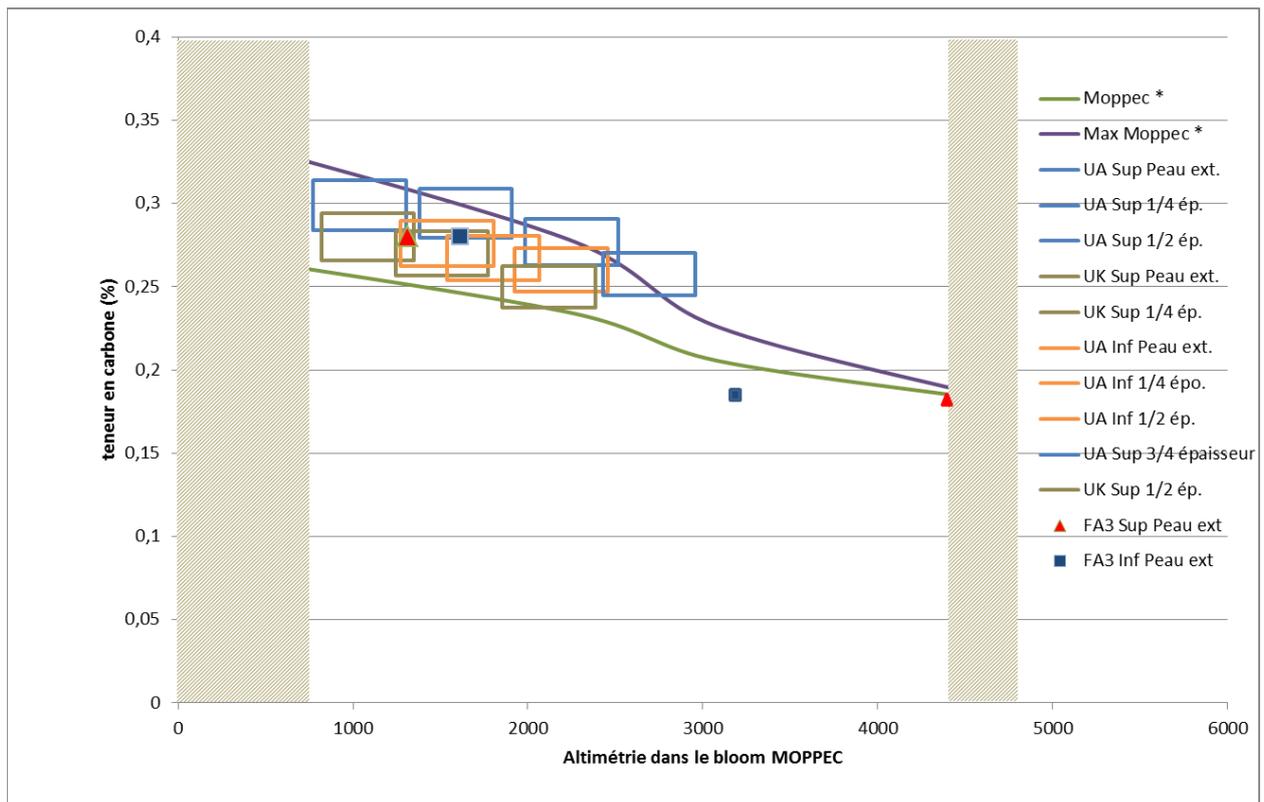


Figure 5 : représentation de la notion de famille de composants

Pour l'ensemble de ces évolutions, AREVA a prévu un échéancier de remise des dossiers s'achevant fin novembre 2016.

Ces dossiers, que l'ASN et l'IRSN doivent instruire, sont intégrés à l'architecture documentaire du dossier de justification présentée en annexe 5.

Annexe 1 : Demandes de la lettre de position de l'ASN du 14 décembre 2015

N°	Demandes	Réponses AREVA
1	L'ASN vous demande de réaliser sur le fond de cuve des essais non destructifs de surface, autres que le ressuage, complémentaires de ceux déjà réalisés dans le cadre de la fabrication pour conforter l'absence de défauts, dans une démarche de type qualification conventionnelle d'essai non destructif.	En cours (méthode de thermographie infrarouge en cours de qualification)
2	L'ASN vous demande de valider, au travers du programme d'essais, l'hypothèse selon laquelle les propriétés mécaniques de résilience des calottes à partir de la mi-épaisseur vers l'intérieur de la cuve sont supérieures à 60 joules à 0°C. À défaut, l'ASN vous demande de compléter la liste des situations et le dossier de justification, en analysant notamment d'autres transitoires.	En cours d'instruction par l'IRSN
3	L'ASN vous demande de démontrer au travers des résultats d'essais que le matériau présente dans le domaine ductile un comportement suffisamment ductile et tenace compatible avec les règles de conception utilisées.	En cours (dossier à fournir par AREVA)
4	L'ASN vous demande d'identifier et conserver l'ensemble de la matière (éprouvettes, chutes...) issue des calottes pour d'éventuelles investigations complémentaires.	Point surveillé par BUREAU VERITAS
5	L'ASN vous demande de préciser, avant l'engagement du programme d'essais et après la caractérisation de l'étendue de la zone ségréguée, la localisation des macrographies et micrographies. L'ASN vous demande également d'analyser les faciès de rupture des éprouvettes.	1 ^{ère} partie de la demande respectée pour UK sup et UA inf 2 ^e partie en cours
6	L'ASN vous demande de lui présenter avant mise en œuvre le plan de prélèvement que vous envisagerez à la suite de ces cartographies chimiques.	Demande respectée pour UK sup et UA inf
7	L'ASN vous demande de faire réaliser les analyses chimiques par un laboratoire accrédité selon la norme NF EN ISO 17025.	Demande respectée
8	L'ASN vous demande de faire réaliser une partie des essais mécaniques, à l'exception des essais Pellini, par un laboratoire accrédité selon la norme NF EN ISO 17025 indépendant du groupe AREVA.	Demande respectée
9	L'ASN vous demande que la démarche permette d'apprécier : - le caractère enveloppe de la courbe ZG6110 du RCC-M indexée sur la RT _{NDT} de fin de vie retenue à la conception diminuée du décalage lié au vieillissement thermique et sous déformation ainsi que de la différence maximale entre la RT _{NDT} de recette des calottes de Flamanville 3 et celle de chacune des deux calottes sacrificielles vis-à-vis des valeurs de ténacité mesurées ; - la cohérence de la T _{NDT} locale avec la valeur retenue à la conception.	En cours (à l'issue du programme expérimental)
10	L'ASN vous demande de déterminer : - la température d'indexation permettant d'envelopper les mesures de ténacité en zone ségréguée ; - la température d'indexation résultant des essais Pellini en zone ségréguée ; - la température d'indexation résultant des essais Charpy en zone ségréguée, dans le cas où la RT _{NDT} locale ne serait pas égale à la T _{NDT} locale. L'ASN vous demande, le cas échéant, de fournir des éléments d'interprétation de la différence entre la T _{NDT} locale et la RT _{NDT} locale.	En cours (à l'issue du programme expérimental)
11	L'ASN vous demande de vérifier que la température d'indexation permettant d'envelopper les mesures de ténacité en zone ségréguée est inférieure aux deux autres températures d'indexation mentionnées à la demande n° 10.	En cours (à l'issue du programme expérimental)
12	L'ASN vous demande de vérifier que les températures d'indexation déterminées par le programme d'essais restent inférieures à la température d'indexation maximale admissible qui résulte des analyses de mécanique à la rupture.	En cours (à l'issue du programme expérimental)
13	L'ASN vous demande de proposer des mesures renforcées de contrôle de mise en service, d'exploitation et de suivi en service adaptées à la situation rencontrée et les reporter dans la notice d'instruction de l'équipement.	En cours (dossier à fournir par AREVA)
14	L'ASN vous demande de réaliser, en lien avec l'exploitant, une étude technique des scénarios d'extraction du corps de cuve du puits du bâtiment réacteur et de remplacement de la calotte du fond de la cuve. Cette étude devra analyser les avantages et inconvénients pour la qualité de réalisation et la sûreté de l'installation.	En cours (dossier à fournir par AREVA)
15	L'ASN vous demande, sans préjuger des résultats de la campagne d'essais mécaniques à venir, d'étudier dès à présent la fabrication d'un nouveau couvercle de cuve en tenant compte du retour d'expérience en matière de conception et de fabrication de l'actuel.	En cours (dossier à fournir par AREVA)

Annexe 2 : Répartition des essais par laboratoire

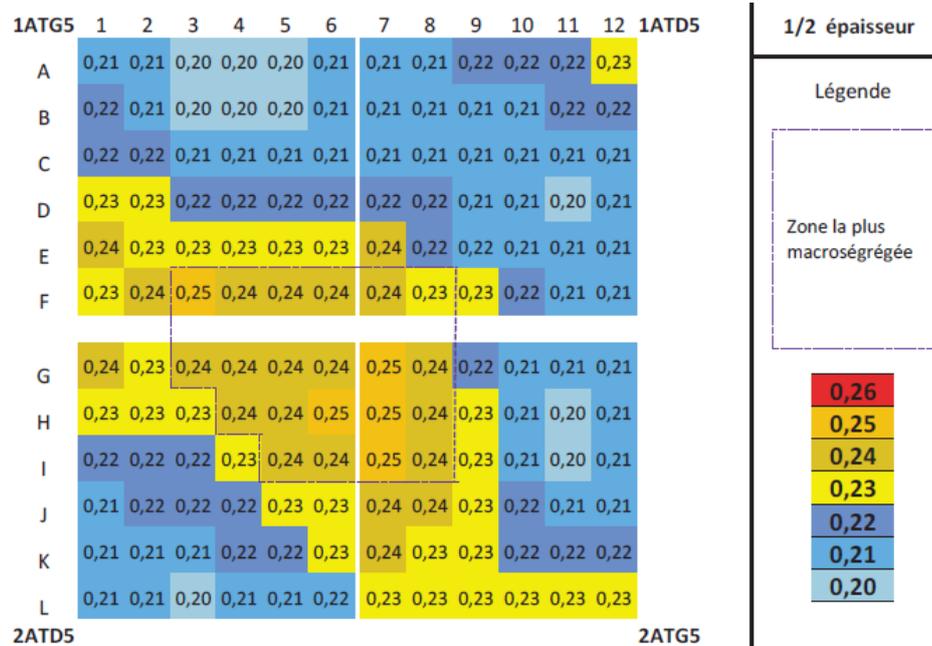
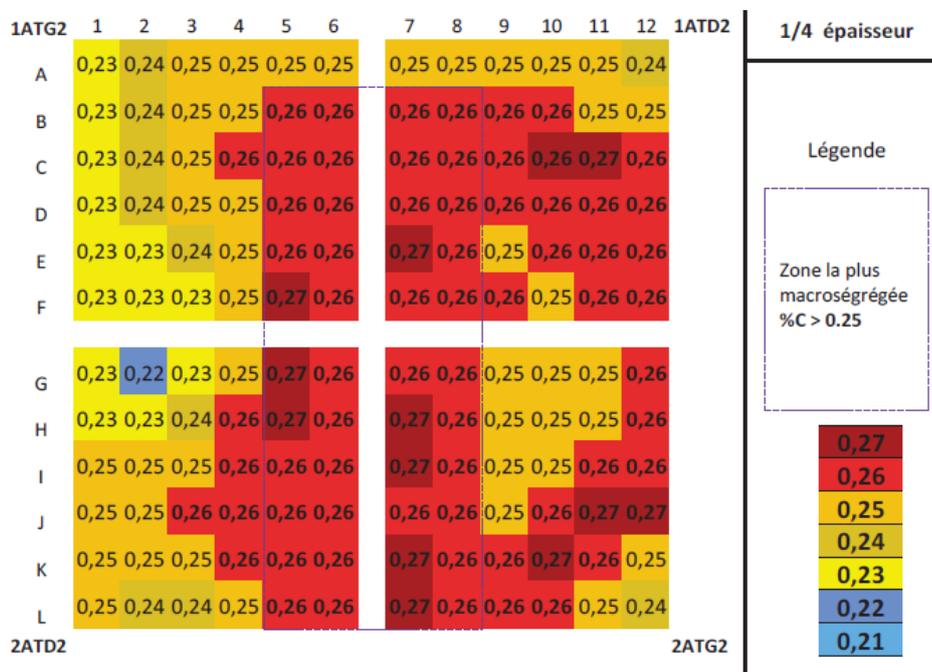
Calotte	Température	FA3 inf	FA3 sup	UK sup			UA inf				UA sup				Total par type d'essai
Essais		Zone de recette	Zone de recette	Zone de recette	Zone ségrégée 1/4 ép	Zone ségrégée 1/2 ép	Zone de recette	Zone ségrégée 1/4 ép	Zone ségrégée 1/2 ép	Zone ségrégée 3/4 ép	Zone de recette	Zone ségrégée 1/4 ép	Zone ségrégée 1/2 ép	Zone ségrégée 3/4 ép	
Charpy (courbe de transition)	variable (dont 0°C)	18	18	18	72	44	18	36	36	36	18	36	36	36	422
Charpy (pour RTndt)	fonction de Tndt	/	/	/	2X12	2X12	/	12	12	12	/	2X12	2X12	12	144
Ténacité (ductile CT 25)	330°C	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	86
Ténacité (ductile CT 25)	50°C	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
Ténacité (ductile CT 25)	50 ou 330°C	2	2	2	8	4	2	2	2	2	2	2	2	2	
Ténacité (fragile CT 12,5)	Variable	40	40	48	144	84	40	72	72	48	20	72	72	48	800
Traction	330°C	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	129
Traction	50°C	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Traction	Ambiante	/	/	/	3	3	/	3	3	3	/	3	3	/	
Traction à T° transition	Variable	6	6	6	10	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
Pellini	Variable	/	/	/	2X8	2X8	/	8	8	8	/	2X8	2X8	8	96
Analyse chimique		18	18	80	283	187	18	145	145	121	18	165	165	118	1481
Total par zone (hors analyses chimiques)		72	72	80	283	187	72	145	145	121	52	165	165	118	1677

	Centre technique AREVA à Erlangen (Allemagne)
	SCK.CEN à Mol (Belgique)
	3 ^e laboratoire (extérieur à AREVA)
	AREVA à Saint Marcel
	FILAB à Dijon

XX Adaptation du nombre d'essais

Annexe 3: Synthèse des cartographies de teneur en carbone par profondeur (mesures chimiques sur copeaux)

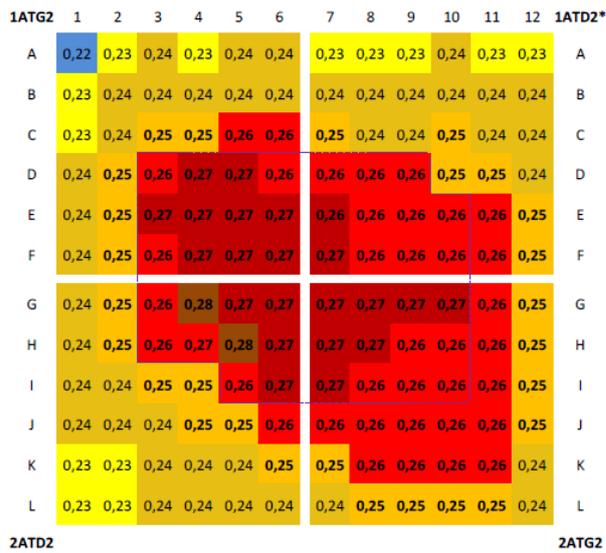
Calotte supérieure UK



Calotte supérieure UA

Cartographie en cours de réalisation.

Calotte inférieure UA

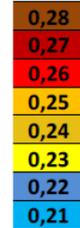


1/4 épaisseur

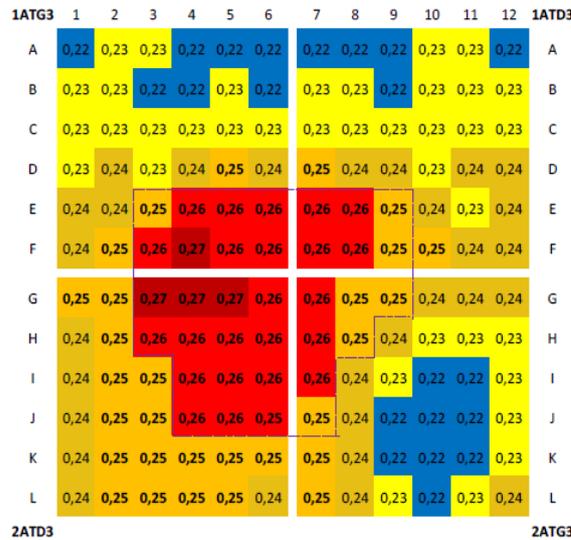
* Teneurs de 1ATD2 à xx mm de la peau

Légende

Zone la plus macroségrégée
%C > 0,25



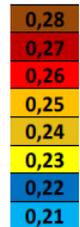
2ATD2 2ATG2



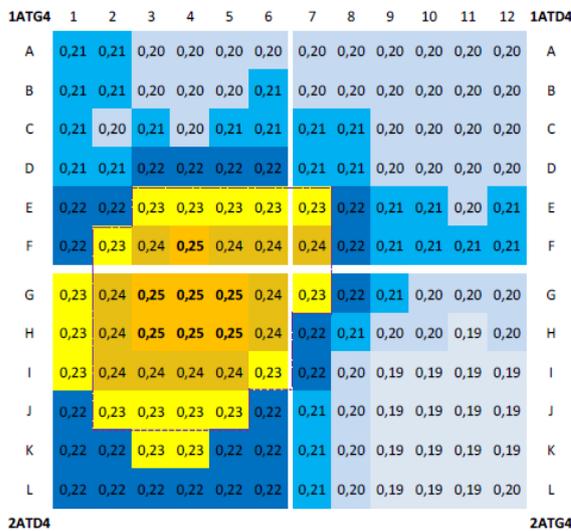
1/2 épaisseur

Légende

Zone la plus macroségrégée



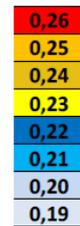
2ATD3 2ATG3



3/4 épaisseur

Légende

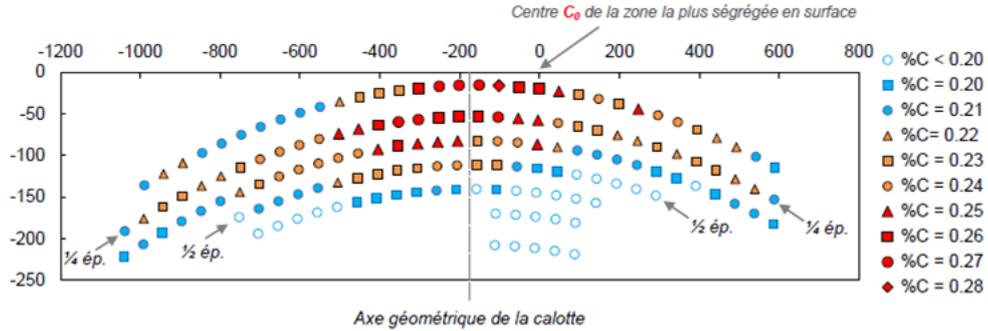
Zone la plus macroségrégée



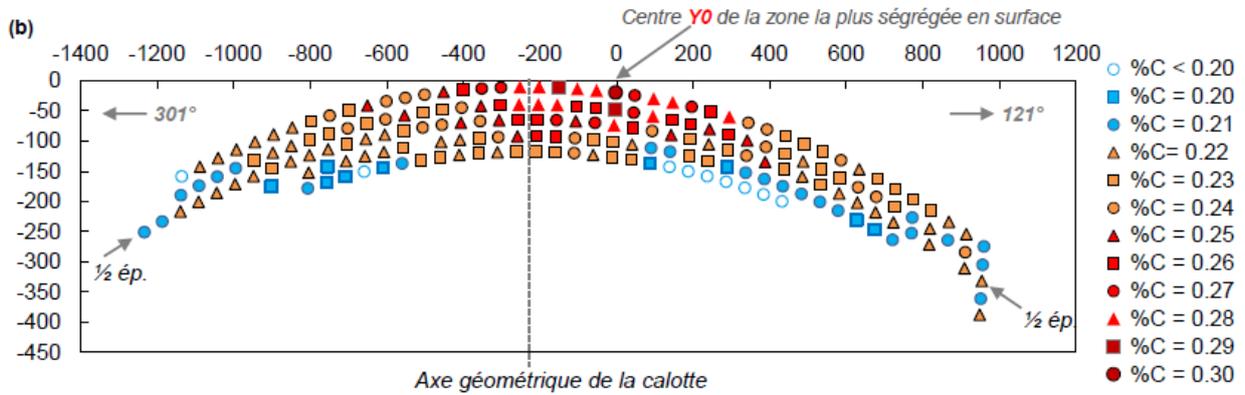
2ATD4 2ATG4

Annexe 4 : Synthèse des cartographies de teneur en carbone dans l'épaisseur
(mesures par spectrométrie portable)

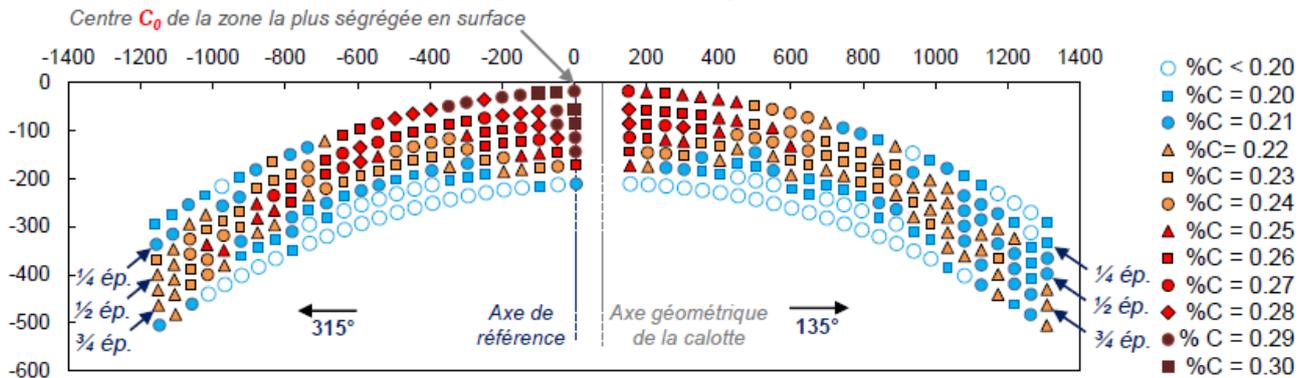
Calotte supérieure UK
(cartographie s'arrêtant sous la mi-épaisseur)



Calotte inférieure UA
(épaisseur totale représentée)



Calotte supérieure UA
(épaisseur totale représentée)



Annexe 5 : Architecture documentaire du dossier final de justification d'AREVA
(les thèmes identifiés par un surlignage jaune ne donnent pas systématiquement lieu à l'émission d'un document spécifique)

Niveau 1		Niveau 2		Niveau 3		Niveau 4			
N°	Thème ou objectif du document	N°	Thème ou objectif du document	N°	Thème ou objectif du document	N°	Thème ou objectif du document		
1	Document de synthèse relatif à la satisfaction des critères mécaniques	1-1	Détermination des caractéristiques mécaniques nécessaires pour démontrer l'aptitude au service des calottes	1-1-1	Identification des transitoires et analyses mécaniques relatives aux chocs chauds				
				1-1-2	Identification des transitoires et analyse mécanique relatives aux chocs froids pour défauts au 1/4 ép. Interne				
		1-2	Eléments de synthèse relatifs à la transposition des résultats obtenus sur les calottes sacrificielles aux pièces de calottes de cuve FA3	1-2-1	Techniques de mesures et performances associées	1-2-1-1	Protocole de réalisation et performances des analyses par spectrométrie		
						1-2-1-2	Protocole de réalisation et performances des analyses par copeaux		
						1-2-1-3	Influence des veines sombres sur les teneurs en carbone mesurées		
				1-2-2	Définition d'une famille de calottes	1-2-2-1	Synthèse des résultats obtenus dans le cadre du programme MOPPEC Ségrégation dans les lingots Arcelor-Mittal 2550		
						1-2-2-2	Stabilité des fabrications vis-à-vis des ségrégations et des effets de trempe Stabilité des fabrications : Note de synthèse sur le positionnement des calottes, l'incertitude et la variabilité des ségrégations Simulations SOLID et FORGE Reproductibilité des fabrications des calottes de cuve EPR : étude des paramètres de fabrication des calottes Sup et Inf de FA3/UK/UA		
		1-2-2-3	Combinaison des effets de trempe et du carbone Simulations des gradients de trempe Influence combinée des effets de trempe et des teneurs en carbone sur la ténacité						
		1-2-3	Appartenance des calottes FA3 à la famille - Synthèse Cohérence de la gamme de fabrication des calottes de cuve FA3 avec celles des calottes sacrificielles	1-2-3-1	Synthèse des mesures de carbone réalisées en surface externes des calottes FA3 Synthèse des mesures de carbone réalisées en surface externe de la calotte supérieure FA3 Synthèse des mesures de carbone réalisées en surface externe de la calotte inférieure FA3 Caractérisation de la ségrégation dans les blocs : macros, spectrographie et copeaux				
		1-3	Définition des caractéristiques de ténacité des zones ségrégées pour différentes profondeurs dans l'épaisseur des calottes.	1-3-1	Choix des laboratoires	1-3-1-1	Mesures de carbone		
						1-3-1-2	Essais mécaniques		
				1-3-2	Interprétation des résultats par rapport aux attendus de la LDS UK Sup	1-3-2-1	Plans de prélèvement Cartographies de surface externe par spectrométrie Cartographies de surface interne par prélèvement de copeaux Caractérisation de la ségrégation sur 1/2 calotte : macrographie et spectrométrie.		
								1-3-2-2	Rapport d'essai
				1-3-3	Interprétation des résultats par rapport aux attendus de la LDS UA Inf	1-3-3-1	Plans de prélèvement Cartographies de surface externe par spectrométrie Cartographies de surface interne par prélèvement de copeaux Caractérisation de la ségrégation sur 1/2 calotte : macrographie et spectrométrie.		
								1-3-3-2	Rapport d'essai
				1-3-4	Interprétation des résultats par rapport aux attendus de la LDS UA Sup	1-3-4-1	Plans de prélèvement Cartographies de surface externe par spectrométrie Cartographies de surface interne par prélèvement de copeaux Caractérisation de la ségrégation sur 1/2 calotte : macrographie et spectrométrie.		
								1-3-4-2	Rapport d'essai
		1-4	Caractérisation des effets du vieillissement sur les propriétés mécaniques						

2	Synthèse des éléments garantissant l'absence de défauts	2-1	Synthèse des éléments garantissant l'absence de défauts en fin de fabrication	2-1-1	Synthèse des résultats de contrôle non destructifs de fabrication		
				2-1-2	Dossier de justification technique et résultats de la mesure de surface du fond de cuve		
		2-2	Mesures renforcées de contrôle de mise en service, d'exploitation et de suivi en service.				
3	Remplacement des calottes	3-1	Etude technique de scénarios d'extraction de corps de cuve et de remplacement de la calotte du fond de la cuve				
		3-2	Etude de fabrication d'un nouveau couvercle.				



DIRECTION DES ÉQUIPEMENTS
SOUS PRESSION NUCLÉAIRES

Montrouge, le 14 décembre 2015

N° Réf : **CODEP-DEP-2015-043888**

Monsieur le Président d'AREVA
Tour AREVA
92084 PARIS LA DEFENSE cedex

Objet : Evaluation de la conformité de la cuve de l'EPR de Flamanville 3
Démarche de justification de la ténacité suffisante des calottes du fond et du couvercle de la cuve

Références : Voir annexe 1.

Monsieur le Président,

Dans le cadre de la qualification technique des calottes du fond et du couvercle de la cuve de l'EPR de Flamanville 3, la mise en évidence de valeurs de résilience inférieures aux critères fixés par le point 4 de l'annexe 1 de l'arrêté en référence [1] vous ont amené à proposer à l'ASN une démarche destinée à justifier la ténacité suffisante du matériau de ces composants.

J'ai demandé au Groupe permanent d'experts pour les équipements sous pression nucléaires de me faire part de son avis sur :

- l'acceptabilité, sur le principe, d'une démarche visant à justifier du caractère suffisant de la ténacité des calottes du fond et du couvercle de la cuve de l'EPR de Flamanville 3 ;
- la notion de la ténacité suffisante du matériau proposée par AREVA et sa méthode de détermination ;
- la méthode de détermination de la ténacité minimale du matériau qui repose notamment sur un programme d'essais, en particulier sur la transposabilité aux calottes de la cuve de l'EPR de Flamanville 3 des résultats obtenus sur d'autres calottes ;
- la démarche de comparaison de la ténacité minimale du matériau et de la ténacité suffisante, notamment les critères associés.

Le Groupe permanent d'experts pour les équipements sous pression nucléaires s'est réuni le 30 septembre 2015 et a fait part à l'ASN de son avis et de ses recommandations en référence [2].

Vous trouverez en annexe les demandes détaillées de l'ASN qui en résultent.

*
* *

Vous avez proposé une démarche visant à justifier le caractère suffisant de la ténacité du matériau des calottes de l'EPR de Flamanville 3. L'ASN considère que la démarche de justification proposée, qui consiste à déterminer une ténacité suffisante et à vérifier qu'elle est inférieure à la ténacité du matériau, est appropriée pour autant que le phénomène en cause soit identifié et expliqué et que la connaissance des propriétés mécaniques soit suffisante.

Toutefois, l'ASN souligne que la démarche de justification proposée repose sur l'hypothèse de propriétés mécaniques satisfaisantes à mi-épaisseur, notamment en matière de résilience. Dans le cas où cette hypothèse ne serait pas confirmée par les résultats des essais réalisés sur les calottes sacrificielles, votre dossier de justification devra être revu.

*
* *

L'ASN considère que le programme d'essais proposé sur deux calottes sacrificielles devrait permettre d'apprécier l'étendue et la profondeur de la zone ségréguée ainsi que son influence sur les propriétés mécaniques.

Ainsi, sous réserve de la prise en compte des éléments figurant en annexe, je considère acceptable dans son principe la démarche que vous proposez pour justifier de la ténacité suffisante des calottes du fond et du couvercle de la cuve de l'EPR de Flamanville 3 et je ne formule pas d'objection au lancement du programme d'essais tel que prévu dans les notes en références [3] à [8].

Je vous informe que l'ASN mandatera un organisme pour la surveillance de l'ensemble des opérations appelées par votre démarche de justification.

Je vous demande de tenir l'ASN informée dans les meilleurs délais de toute anomalie dans le déroulement des opérations du programme d'essais et, de manière globale, de l'avancement et des résultats au fur et à mesure de la mise en œuvre de la démarche.

*
* *

Je note que vous envisagez de poursuivre les opérations de fabrication sur le couvercle (épreuve hydraulique, soudage des fermetures d'adaptateurs d'instrumentation, expédition sur site, habillage, calorifugeage...) sans attendre les résultats des essais qui seront réalisés sur les calottes sacrificielles.

Je note également que les conditions opératoires spécifiques prévues pour l'épreuve hydraulique du couvercle ont été définies pour tenir compte de la présence de ségrégations majeures positives.

Je partage votre constat selon lequel aucun contrôle complémentaire à ceux déjà réalisés, en lien avec la démarche de justification de la présence de ségrégations majeures positives, n'est envisageable sur le couvercle de la cuve.

Ainsi, sans préjuger des résultats de la démarche de justification de son aptitude au service, je n'ai pas d'objection à la poursuite des opérations de fabrication sur le couvercle de la cuve de l'EPR de Flamanville 3. Je vous rappelle toutefois qu'on ne peut pas exclure que l'instruction conduise à ne pas accepter le couvercle et le fond de cuve.

C'est pourquoi je considère nécessaire que vous étudiez dès à présent l'ensemble des scénarios techniques alternatifs, tels que le remplacement du fond de cuve et la fabrication d'un nouveau couvercle.

*
* *

La présence des ségrégations, à l'origine du non-respect des valeurs de résilience mentionnées dans l'arrêté en référence [1], découle du procédé, retenu par AREVA et son fournisseur Creusot Forge. Celui-ci repose sur l'utilisation de lingots de fort tonnage et conduit à une élimination insuffisante des ségrégations dans le composant final pour garantir les propriétés minimales attendues pour la conception de l'équipement.

Je considère que le dossier de qualification technique que vous avez présenté pour les calottes du fond et du couvercle de la cuve de Flamanville 3 montre que le risque d'hétérogénéité dû aux ségrégations majeures positives résiduelles, phénomène métallurgique connu, a été mal apprécié et ses conséquences mal quantifiées.

Je considère donc que l'exigence de qualification technique n'est pas respectée et que vous n'avez pas fait le choix de la meilleure technique disponible pour la réalisation des calottes de la cuve de l'EPR. Vous devrez en conséquence déposer une demande au titre de l'article R. 557-1-3 du code de l'environnement. Cette demande devra être justifiée au regard de solutions alternatives telles que le remplacement du fond de cuve et la fabrication d'un nouveau couvercle, et devra intégrer des mesures compensatoires vis-à-vis de l'impact de ces écarts sur le premier niveau de la défense en profondeur.

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

**Le Président
de l'Autorité de sûreté nucléaire**

SIGNE PAR

Pierre-Franck CHEVET

Annexe 1 à la lettre CODEP-DEP-2015-043888

Références

- [1] Arrêté du 12 décembre 2005 relatif aux équipements sous pression nucléaires
- [2] Lettre CODEP-MEA-2015-040055 du 1^{er} octobre 2015 – Avis et recommandations du Groupe permanent d'experts « Equipements sous pression nucléaires » du 30 septembre 2015
- [3] Note TTZSGN/NCR0003 révision A : « Procédure de traitement thermique de détensionnement simulé »
- [4] Note PFCSGN/NCR0003 révision B : « Programme d'essais sur pièce sacrificielle : première phase »
- [5] Note MDHTDM DT 15.020 révision A : « Programme d'essais sur calotte sacrificielle: détermination de la zone ségréguée majeure positive en carbone dans l'épaisseur »
- [6] Note PFCSGN/NCR0002 révision D : « Programme d'essais sur calotte sacrificielle: essais mécaniques »
- [7] Note PFCSGN/NCR0004 révision A : « Découpe de la zone ségréguée UK supérieure pour cartographie Carbone »
- [8] Note PFCSGN/NCR0005 révision A : « Première étape du programme d'essai sur pièce sacrificielle UA inférieure »
- [9] ARR-DEP-2015-00354 du 11 septembre 2015 – Engagements AREVA relatif au projet de rapport au GP ESPN

Demandes complémentaires

A. Qualification technique et choix du procédé de fabrication des calottes de la cuve de l'EPR de Flamanville 3

L'ASN considère que la présence d'une zone de ségrégation majeure positive dans les calottes du fond et du couvercle de cuve de l'EPR de Flamanville 3 découle du procédé retenu, qui n'a pas permis de garantir les propriétés minimales attendues pour la conception de l'équipement.

L'ASN note que le procédé retenu, même si une réflexion a été menée pour placer la zone de ségrégation, dans chacune des deux calottes, à un endroit minimisant les inconvénients, a conduit à la présence dans la pièce finie d'une zone de ségrégation majeure positive atteignant un taux de ségrégation de 50 %.

L'ASN note que d'autres procédés de fabrication, notamment celui mis en œuvre pour les calottes de cuve de l'EPR d'Olkiluoto 3, auraient permis d'éviter le phénomène de ségrégation majeure positive constaté.

L'ASN considère que le dossier de qualification technique des calottes du fond et du couvercle de la cuve de Flamanville 3 montre que le risque d'hétérogénéité dû aux ségrégations majeures positives résiduelles, phénomène métallurgique connu, a été mal apprécié et ses conséquences mal quantifiées.

L'ASN considère que l'exigence de qualification technique n'est pas respectée et qu'AREVA n'a pas fait le choix de la meilleure technique disponible pour la réalisation des calottes de la cuve de l'EPR de Flamanville 3. Ces constatations affectent le premier niveau de défense en profondeur, qui vise à assurer la garantie d'un haut niveau de qualité de conception et de fabrication de la cuve destinée à l'EPR de Flamanville 3.

B. Détermination de la ténacité suffisante

1. Etat des calottes de l'EPR de Flamanville 3

L'ASN note que les contrôles réalisés n'ont pas conduit à la détection de défauts dans les calottes de l'EPR de Flamanville 3.

L'ASN n'a pas de remarque particulière sur les essais non destructifs que vous avez réalisés pour la détection de défauts non débouchants et leurs performances.

Toutefois, l'ASN considère que le contrôle par ressuage que vous avez réalisé ne permet pas de s'assurer de l'absence de défauts débouchants de faibles dimensions, désorientés, éventuellement remplis d'oxyde et pouvant présenter une surface lisse.

Demande n° 1 : L'ASN vous demande de réaliser sur le fond de cuve des essais non destructifs de surface, autres que le ressuage, complémentaires de ceux déjà réalisés dans le cadre de la fabrication pour conforter l'absence de défauts, avec une démarche de type qualification conventionnelle d'essai non destructif.

2. Analyse dans le domaine fragile et dans le domaine de la transition fragile-ductile

a. Défaut analysé

L'ASN considère que « l'analyse détaillée » de l'annexe ZG du RCC-M est acceptable pour déterminer une ténacité suffisante permettant de déduire la température minimale pour se prémunir du risque de rupture brutale en situation d'épreuve hydraulique.

A ce titre, l'ASN note que vous avez prévu de déterminer la température des épreuves hydrauliques sur la base d'une « analyse détaillée », conformément à l'annexe ZG 4000 du code RCC-M, dans la mesure où une « analyse conventionnelle », conformément à l'annexe ZG 3000, conduirait à une température industriellement contraignante ou présentant des risques pour la sécurité des intervenants.

L'ASN note également votre engagement en référence [9] visant à compléter le dossier d'analyse de risque de rupture brutale par des évaluations des situations de fonctionnement prenant en compte un défaut correspondant à une « analyse conventionnelle » au titre d'études de sensibilité.

b. Situations et charges

L'ASN prendra ultérieurement position sur la liste des situations à examiner pour s'assurer du respect des critères associés à la démonstration de la tenue en service de la seconde barrière de confinement.

L'ASN souligne d'ores et déjà que la sélection des situations limitatives et des chargements sollicitants a été menée par AREVA en supposant que l'impact de la zone ségréguée s'étend depuis la surface externe de chaque calotte sans dépasser la mi-épaisseur.

Demande n° 2: L'ASN vous demande de valider, au travers du programme d'essais, l'hypothèse selon laquelle les propriétés mécaniques de résilience des calottes à partir de la mi-épaisseur vers l'intérieur de la cuve sont supérieures à 60 joules à 0°C. A défaut, l'ASN vous demande de compléter la liste des situations et le dossier de justification, en analysant notamment d'autres transitoires.

c. Vieillissement

L'ASN note que la fluence dans les zones considérées n'est pas de nature à conduire à des dommages dus à l'irradiation.

L'ASN note votre engagement en référence [9] de fournir, en lien avec EDF, un dossier fondé sur des résultats d'essais, permettant de statuer sur la nécessité d'engager un programme spécifique sur le vieillissement thermique des pièces fortement ségréguées.

3. Analyse dans le domaine ductile

Demande n° 3: L'ASN vous demande de démontrer au travers des résultats d'essais que le matériau présente dans le domaine ductile un comportement suffisamment ductile et tenace compatible avec les règles de conception utilisées.

C. Détermination de la ténacité minimale et des propriétés mécaniques du matériau

1. Représentativité de la calotte supérieure UK et de la calotte inférieure UA

L'ASN considère que les calottes supérieure UK et inférieure UA sont représentatives de la calotte supérieure de Flamanville 3 au vu de leur composition chimique à la coulée et mesurée sur pièce, de leur gamme de fabrication et des niveaux de carbone relevés en surface.

L'ASN note que les mesures de concentration en carbone réalisées jusqu'à présent ne permettent pas d'apprécier la profondeur de la zone ségréguée dans la calotte inférieure destinée à l'EPR de Flamanville 3. Par ailleurs, l'ASN considère que le programme de caractérisation des propriétés mécaniques de la zone ségréguée ne peut se limiter à déterminer les propriétés d'un matériau issu d'un seul composant.

Ainsi, l'ASN note votre engagement en référence [9] visant à réaliser une caractérisation chimique et un programme d'essais mécaniques sur la calotte inférieure UA identiques à ceux qui seront réalisés sur la calotte supérieure UK.

Si les résultats d'essais mettent en évidence que les propriétés mécaniques sont affectées par un autre phénomène que la présence d'une ségrégation majeure positive, l'ASN considère que vous devrez apporter la démonstration que les calottes UK et UA sont représentatives de celles de Flamanville 3 au regard du nouveau phénomène constaté.

2. Traitement thermique

Dans la mesure où votre objectif est de déterminer les propriétés du matériau de la cuve de l'EPR de Flamanville 3 dans le cadre de son exploitation, l'ASN considère qu'un traitement thermique équivalent à celui subi par cette cuve doit être appliqué aux pièces dans lesquelles seront prélevées les éprouvettes.

A ce titre, l'ASN note votre engagement en référence [9] de réaliser un traitement thermique de détensionnement simulé sur les coupons d'essais issus des calottes UA inférieure et UK supérieure.

3. Suffisance du nombre d'essais

L'ASN considère que les zones ségréguées doivent faire l'objet d'une caractérisation approfondie. L'ASN considère que la suffisance du programme d'essais ne pourra être complètement appréciée qu'*a posteriori*, après le dépouillement et l'interprétation des résultats d'essais.

Demande n° 4: L'ASN vous demande d'identifier et conserver l'ensemble de la matière (éprouvettes, chutes...) issue des calottes pour d'éventuelles investigations complémentaires.

4. Interprétation des résultats d'essais

L'ASN considère que les analyses chimiques prévues sur chaque éprouvette rompue au plus près de la zone de rupture permettront de s'assurer que le programme d'essais caractérise effectivement la zone ségréguée.

L'ASN considère que les macrographies et micrographies devront permettre de caractériser la structure du matériau ségrégué et qu'une analyse des faciès de rupture des éprouvettes doit être réalisée, pour s'assurer que l'on est en présence de structures et de comportements connus.

Demande n° 5 : L'ASN vous demande de préciser, avant l'engagement du programme d'essais et après la caractérisation de l'étendue de la zone ségréguée, la localisation des macrographies et micrographies. L'ASN vous demande également d'analyser les faciès de rupture des éprouvettes.

L'ASN note que les éprouvettes seront positionnées en tenant compte du résultat de la cartographie chimique par spectrométrie en surface des huit tranches destinées aux essais mécaniques (traction, résilience et ténacité).

Demande n° 6 : L'ASN vous demande de lui présenter, avant sa mise en œuvre, le plan de prélèvement que vous envisagerez à la suite de ces cartographies chimiques.

5. Choix du laboratoire

L'ASN considère que l'accréditation selon la norme NF EN ISO 17025 du laboratoire d'Erlangen, retenu par vos services pour les essais mécaniques à l'exception des essais Pellini, apporte des garanties satisfaisantes en matière de savoir-faire technique et de quantification des incertitudes. De plus, l'ASN note que ce laboratoire intervient dans des programmes d'expertise pour des réacteurs nucléaires étrangers (Doel 3, Tihange 2 et Olkiluoto 3 notamment).

L'ASN considère que les essais Pellini devront être réalisés dans des conditions permettant leur comparaison avec ceux réalisés précédemment sur le parc français en exploitation.

Demande n° 7 : L'ASN vous demande de faire réaliser les analyses chimiques par un laboratoire accrédité selon la norme NF EN ISO 17025.

L'ASN considère que la réalisation d'une partie des essais mécaniques par un laboratoire indépendant du groupe AREVA renforcerait la robustesse des résultats du programme d'essais et la confiance dans leur impartialité.

Demande n° 8 : L'ASN vous demande de faire réaliser une partie des essais mécaniques, à l'exception des essais Pellini, par un laboratoire accrédité selon la norme NF EN ISO 17025 indépendant du groupe AREVA.

D. Comparaison de la ténacité minimale du matériau à la ténacité suffisante

L'ASN considère qu'il convient de comparer les propriétés de l'acier des calottes de la cuve de l'EPR de Flamanville 3 dans la zone ségréguée aux propriétés observées dans les zones de recette. Lors des essais de recette des calottes de cuve, il a pu être constaté que la RT_{NDT}^1 est identique à la T_{NDT}^2 comme cela est courant pour un acier de type 16MND5. L'ASN considère nécessaire de comparer la T_{NDT} mesurée localement dans la zone de ségrégation majeure positive à la valeur de RT_{NDT} mesurée dans la zone de recette.

Il convient par ailleurs de s'assurer que l'acier des calottes de la cuve de l'EPR de Flamanville 3 dans la zone ségréguée présentera en fin de vie une ténacité suffisante.

¹ Température de référence de transition à ductilité nulle

² Température de transition à ductilité nulle

Demande n° 9 : L'ASN vous demande d'apprécier :

- le caractère enveloppe de la courbe ZG 6110 du RCC-M indexée sur la RT_{NDT} de fin de vie retenue à la conception, diminuée du décalage lié au vieillissement thermique et sous déformation ainsi que de la différence maximale entre la RT_{NDT} de recette des calottes de Flamanville 3 et celle de chacune des deux calottes sacrificielles, vis-à-vis des valeurs de ténacité mesurées ;
- la cohérence de la T_{NDT} locale avec la valeur retenue à la conception.

Par ailleurs, les essais mécaniques qui seront réalisés sur le matériau en zone ségréguée des deux calottes sacrificielles permettront de déterminer différentes températures d'indexation, notamment :

- une température d'indexation permettant d'envelopper les mesures de ténacité en zone ségréguée (température la plus basse permettant à la courbe de l'annexe ZG 6110 du RCC-M d'envelopper les mesures réalisées en zone ségréguée) ;
- une température d'indexation résultant de la démarche figurant au paragraphe MC 1230 du code RCC-M (c'est-à-dire la température de transition à ductilité nulle T_{NDT} déterminée à l'aide d'essais Pellini,) en zone ségréguée ;
- une température d'indexation résultant de la démarche figurant au paragraphe MC 1240 du code RCC-M (c'est-à-dire la RT_{NDT} , déterminée à l'aide de la T_{NDT} et d'essais Charpy) en zone ségréguée.

Demande n° 10 : L'ASN vous demande de déterminer :

- la température d'indexation permettant d'envelopper les mesures de ténacité en zone ségréguée ;
- la température d'indexation résultant des essais Pellini en zone ségréguée ;
- la température d'indexation résultant des essais Charpy en zone ségréguée, dans le cas où la RT_{NDT} locale ne serait pas égale à la T_{NDT} locale.

L'ASN vous demande, le cas échéant, de fournir des éléments d'interprétation de la différence entre la T_{NDT} locale et la RT_{NDT} locale.

Demande n° 11 : L'ASN vous demande de vérifier que la température d'indexation permettant d'envelopper les mesures de ténacité en zone ségréguée est inférieure aux deux autres températures d'indexation mentionnées à la demande n° 10.

Les analyses de mécanique à la rupture permettront par ailleurs de déterminer par calcul une température d'indexation maximale admissible pour prévenir le risque de rupture brutale lors des épreuves hydrauliques avec les marges appropriées.

Demande n° 12 : L'ASN vous demande de vérifier que les températures d'indexation déterminées par le programme d'essais sont inférieures à la température d'indexation maximale admissible qui résulte des analyses de mécanique à la rupture.

L'ASN considère que le non-respect des critères mentionnés aux demandes n° 11 et 12 remettrait en cause les fondements de la démarche de justification proposée par AREVA.

E. Conséquence de la démarche de justification sur la déclinaison du principe de défense en profondeur

L'ASN note que la démarche de justification que vous proposez est une analyse du comportement mécanique à la rupture brutale des calottes du fond et du couvercle de la cuve de Flamanville 3, fondée sur des essais menés sur deux pièces sacrificielles représentatives. Cette démarche est susceptible de mettre en évidence que le procédé de fabrication confère au matériau des propriétés mécaniques d'un niveau suffisant pour prévenir les risques redoutés.

Toutefois, l'ASN considère que cette démarche seule ne permettra pas de restaurer la garantie sur la robustesse du premier niveau de défense en profondeur qu'aurait apportée une qualification technique conforme aux standards actuels.

Demande n° 13 : L'ASN vous demande de proposer des mesures renforcées de contrôle de mise en service, d'exploitation et de suivi en service adaptées à la situation rencontrée et les reporter dans la notice d'instruction de l'équipement.

F. Autres demandes

Etant donné les enjeux de sûreté associés à la cuve de l'EPR de Flamanville 3, et sans préjuger des résultats des essais qui sont à mener et de leur interprétation, l'ASN considère nécessaire d'étudier l'ensemble des scénarios techniques alternatifs.

Demande n° 14 : L'ASN vous demande de réaliser, en lien avec l'exploitant, une étude technique des scénarios d'extraction du corps de cuve du puits du bâtiment réacteur et de remplacement de la calotte du fond de la cuve. Cette étude devra analyser les avantages et inconvénients pour la qualité de réalisation et la sûreté de l'installation.

Par ailleurs, le couvercle de la cuve est un composant qui peut être remplacé.

Demande n° 15 : L'ASN vous demande, sans préjuger des résultats de la campagne d'essais mécaniques à venir, d'étudier dès à présent la fabrication d'un nouveau couvercle de cuve en tenant compte du retour d'expérience en matière de conception et de fabrication de l'actuel.