



FA3

Nb total de pages : 108  
Nombre d'Annexes : 0

Titre du document :

## Justification de la ténacité suffisante des calottes du fond et du couvercle de la cuve de l'EPR de Flamanville 3

Sujet :

Justification of sufficient toughness for FA3 RPV heads (cover and bottom

Zone réservée pour les tampons électroniques

B	2017-04-27	BPE				
REV	DATE	ETAT	AUTEUR	VÉRIFICATEUR	ÉMETTEUR	MODIFICATIONS/ OBSERVATIONS

Projet: <b>FRA001</b>	Contrat:	Entité Émettrice: <b>FFP</b>	Dept Émetteur:
Nature du document : <b>AE - NOTE D'ETUDE OU DE SYNTHESE</b>		Discipline : <b>A - PRIMARY COMPONENTS</b>	
Work Package:		Système : <b>RCP</b>	
Localisation :			
Repère fonctionnel :		Id. Court:	
		<b>D02-ARV-01-104-503</b>	
		<b>NUMERO DE DOCUMENT</b>	

Ce document est la propriété de AREVA. Il ne peut être utilisé, reproduit, communiqué ou divulgué sans autorisation écrite préalable de AREVA  
Les produits marqués "AL différent de N" sont sujets aux autorisations d'exportation Européenne ou Allemande lors d'une exportation hors de l'Europe. Les produits marqués "ECCN différent de N" sont sujets aux autorisations de ré-exportation Américaine. Avec ou sans marque "AL:N" ou "ECCN:N", une autorisation peut-être nécessaire en fonction de la destination et de l'utilisation de ces produits. La version originale de ce document est stockée électroniquement dans le système de Gestion Electronique de Document (GED). L'état actuel du document peut uniquement être vu dans le système de GED.

ECCN: N

AL: 0E001



## RÉVISIONS

IND REV	DATE D'ÉMISSION	PARAGRAPHE	OBJET DE LA RÉVISION
A	2016-12-16		Edition originale
B	Voir Page de garde		

## TABLE DES MATIERES

0.	RÉFÉRENCES	8
1.	INTRODUCTION	10
2.	DEMARCHE RETENUE	11
2.1.	Le sujet technique	11
2.2.	Démarche initiale	12
2.3.	Evolution de la démarche début 2016	14
3.	RESULTATS ET ANALYSES	16
3.1.	Typologie et Taille de défaut pris en compte	16
3.1.1.	<i>Défauts inacceptables au sens de la qualité visée et adéquation des moyens de contrôle</i>	16
3.1.2.	<i>Contrôles complémentaires en peau externe</i>	17
3.1.3.	<i>Performance des moyens de contrôle et définition d'un défaut enveloppe</i>	18
3.1.4.	<i>Contrôles de défaut en peau interne</i>	19
3.1.5.	<i>Potentialité de défaut en exploitation</i>	19
3.1.6.	<i>Conclusion</i>	20
3.2.	Caractéristiques mécaniques des calottes sacrificielles	22
3.2.1.	<i>Le programme d'essai</i>	22
3.2.2.	<i>Caractéristiques mécaniques en zone de recette</i>	25
3.2.3.	<i>Caractéristiques des zones ségréguées dans le domaine fragile</i>	27
3.2.4.	<i>Caractéristiques dans le domaine ductile</i>	35
3.2.5.	<i>Conclusion</i>	37
3.3.	Représentativité des calottes sacrificielles pour les calottes de la cuve de Flamanville	38
3.3.1.	<i>Définition des paramètres influents</i>	38
3.3.2.	<i>Positionnement des pièces</i>	39
3.3.3.	<i>Caractérisation des ségrégations dans les pièces sacrificielles</i>	40
3.3.4.	<i>Représentativité des calottes sacrificielles vis-à-vis des calottes de Flamanville 3</i>	43
3.3.5.	<i>Conclusion</i>	47
3.4.	Comparaison des caractéristiques mécaniques avec les besoins issues des calculs	48
3.4.1.	<i>Hypothèses principales des calculs mécaniques</i>	51
3.4.2.	<i>Résultats de l'analyse rupture brutale sans tenir compte de la ségrégation</i>	54
3.4.3.	<i>Détermination de la température d'indexation maximale admissible issues des études de rupture brutale en peau externe</i>	55
3.4.4.	<i>Détermination de la température d'indexation maximale admissible issues des études de rupture brutale en peau interne</i>	57
3.4.5.	<i>Comparaison des caractéristiques mécaniques mesurées avec la température d'indexation maximale admissible</i>	59

3.4.6.	<i>Appréciation des marges en ténacité en peau externe</i>	63
3.4.7.	<i>Sensibilité à la taille du défaut – défaut conventionnel a = 20 mm</i>	67
3.4.8.	<i>Conservatismes de ces études</i>	69
3.4.9.	<i>Impact sur les autres dommages mécaniques</i>	71
4.	<b>CONTROLE EN SERVICE</b>	72
5.	<b>BILAN DES REPONSES AUX DEMANDES DE L'ASN</b>	74
6.	<b>CONCLUSIONS</b>	83
7.	<b>ANNEXE 1 :</b> [REDACTED]	
	[REDACTED]	86
7.1.	[REDACTED]	86
7.1.1.	[REDACTED]	86
7.1.2.	[REDACTED]	86
7.1.3.	[REDACTED]	87
7.1.4.	[REDACTED]	89
7.1.5.	[REDACTED]	89
7.1.6.	[REDACTED]	91
7.1.7.	[REDACTED]	93
7.1.8.	[REDACTED]	95
7.1.9.	[REDACTED]	100
7.2.	[REDACTED]	100
7.2.1.	[REDACTED]	100
7.2.2.	[REDACTED]	100
8.	[REDACTED]	102
9.	<b>ANNEXE 3 : EVALUATION DU DECALAGE EN TEMPERATURE PAR COMPARAISON DES COURBES DE RESILIENCE APPROCHE INITIALE PENALISANTE</b>	105
10.	<b>ANNEXE 4 : IMPACT DU VIEILLISSEMENT SUR LA RT<sub>NDT</sub> DE LA CUVE</b>	107
10.1.	<b>Introduction</b>	107
10.2.	<b>Fragilisation par irradiation</b>	107
10.3.	<b>Vieillissement thermique</b>	107
10.4.	<b>Conclusion</b>	108

Ces deux annexes contiennent des informations relevant du secret industriel et commercial

AL: UEUUT ECUU: Z

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : - synthèse du programme d'essai	22
Tableau 2 : Synthèse des résultats de ténacité dans le domaine de la transition pour les zones de recette	26
Tableau 3 : Décalage sur les caractéristiques de traction entre zones ségréguées et zones de recette.	27
Tableau 4 : Caractérisation des courbes de transition obtenues par essais de flexion par choc	28
Tableau 5 : Caractérisation de la transition en zone ségréguée	28
Tableau 6 : Evaluation de l'impact de la ségrégation sur le domaine de la transition fragile-ductile	29
Tableau 7 : Evaluation des vitesses de refroidissement lors de la trempe des calottes.	32
Tableau 8: Evaluation de l'impact de la teneur en carbone sur la transition fragile-ductile	34
Tableau 9 : Mesures de carbone en surface – outil et procédure affinée	45
Tableau 10 – coefficients d'échange pris en compte	51
Tableau 11 – Coefficient de sécurité du RCCM en fonction de la catégorie	52
Tableau 12 – Bilan des calculs en peau externe des calottes pour une $RT_{NDT}$ de conception ( $RT_{NDT} = -5^{\circ}C$ )	54
Tableau 13 – Bilan des calculs en peau interne des calottes pour une $RT_{NDT}$ de conception ( $RT_{NDT} = -5^{\circ}C$ )	55
Tableau 14 – Situations prépondérantes pour l'analyse d'un défaut débouchant en peau externe des calottes	56
Tableau 15 – $RT_{NDT}$ admissible pour les défauts débouchants en peau externe des calottes	57
Tableau 16 – Situations prépondérantes pour l'analyse d'un défaut débouchant en peau externe des calottes	58
Tableau 17 – $RT_{NDT}$ admissible pour les défauts débouchants en peau interne des calottes	58
Tableau 18: $RT_{NDT}$ de recette pour les calottes sacrificielles et de la cuve de FA3	59
Tableau 19 - Comparaison des températures d'indexation mesurées et issues des calculs pour les calottes supérieures en surface extérieure	60
Tableau 20 – Comparaison des températures d'indexation mesurées et issues des calculs pour les calottes inférieures en surface extérieure	61

Tableau 21 – Comparaison des températures d'indexation mesurées et issues des calculs pour les calottes inférieures et supérieures au $\frac{3}{4}$ épaisseur	62
Tableau 22 – Bilan de l'analyse des défauts débouchants en peau externe des calottes pour une température d'indexation fin de vie $T_{env}$ de $+19^{\circ}\text{C}$	64
Tableau 23 – Bilan de l'analyse des défauts débouchants en peau externe des calottes pour une température d'indexation fin de vie $T_{env}$ de $+19^{\circ}\text{C}$	68

### LISTE DES FIGURES

Figure 1 – Cartographie carbone sur la tranche d'une demi calotte UK sup	12
Figure 2 - identification de la zone macro ségrégée dans l'épaisseur de la pièce - ex/ de la calotte UK sup	23
Figure 3 - Découpe des tranches dans les blocs issus de la macroségrégation positive (ex/ de UK sup)	23
Figure 4 – Localisation de la macroségrégation positive au quart épaisseur dans la calotte supérieure UK sup	24
Figure 5 – plan de prélèvement à quart épaisseur de la calotte UK sup (tranche 2 et tranche 3)	24
Figure 6 : Courbes de transition en zone de recette	26
Figure 7 : Comparaison des essais de ténacité avec la courbe ZG indexée par la $RT_{NDT}$ de recette.	30
Figure 8 : Comparaison des essais de ténacité avec la courbe ZG indexée par la $RT_{NDT}$ de recette pour les éprouvettes dont la teneur en carbone est supérieure ou égale à 0,25%	31
Figure 9 : Evolution des décalages de $T_0$ , T68J et TCV entre zones ségrégées et zone de recette en fonction de la teneur en carbone.	33
Figure 10 : Ensemble des points finaux obtenus lors des essais de déchirure en zones ségrégées à $50^{\circ}\text{C}$ .	36
Figure 11 : Evolution de la teneur en carbone maximale – Synthèse des trois calottes sacrificielles – Taux de ségrégation	41
Figure 12 : Evolution de la teneur en carbone maximale – Synthèse des trois calottes sacrificielles – Valeurs absolues	41
Figure 13 : Evolution de la teneur carbone maximale – Synthèse des trois calottes sacrificielles – Prise en compte des incertitudes	42
Figure 14 : Mesures réalisées par spectrométrie en surface externe des calottes de cuve (2015)	44

Figure 15 : Distribution des points de Mesures de Carbone en surface de la calotte UA inf	45
Figure 16 – Type et localisation des défauts calculés	53
Figure 17 – Evolution de ténacité $K_{cp}(T)$ pour les situations dimensionnantes en peau externe de la calotte supérieure superposé à l'évolution de la ténacité critique $K_{IC}(T)$ indexé sur une $T_{env}$ de $+19^{\circ}C$	65
Figure 18 – Evolution de ténacité $K_{cp}(T)$ pour les situations dimensionnantes en peau externe de la calotte supérieure superposé à l'évolution de la ténacité critique $K_{IC}(T)$ indexé sur une $T_{env}$ de $+19^{\circ}C$	65
Figure 19 - Ensemble des points de ténacité du programme d'essai en fonction de $T - RT_{NDT}$ recette (de chaque calotte)	67
Figure 20: Calotte UA. Evaluation de la transition de résilience entre zone de recette et $\frac{1}{4}$ épaisseur tête dans l'axe	106





[Redacted content]

Références contenant en tout ou partie des informations relevant du secret industriel et commercial

[Redacted content]

## 1. INTRODUCTION

---

Dans le cadre de l'évaluation de la conformité à l'arrêté ESPN [1] de la cuve destinée à l'EPR de FLA3, AREVA a mis en évidence fin 2014, pour les cajottes de la cuve, des résultats de résilience inférieurs à la valeur requise par cet arrêté (60 J à 0°C requis en tout point, en valeurs individuelles).

L'instruction a permis de mettre en évidence une ségrégation majeure positive résiduelle de carbone. AREVA a proposé une méthode de justification basée sur un programme expérimental sur des calottes sacrificielles et des analyses mécaniques de tenue à la rupture brutale. Cette méthode et ce programme ont fait l'objet de deux réunions de Groupes Permanents (GP ESPN), le 30 septembre 2015 et le 24 juin 2016, et de deux lettres de suite de la part de l'ASN le 14 décembre 2015 et le 26 septembre 2016.

L'objet de ce document est de synthétiser les résultats et les conclusions du programme d'essai, les analyses associées permettant d'apporter les éléments de justification de la ténacité suffisante des calottes de la cuve de Flamanville 3 et ainsi de leur aptitude au service.

## 2. DEMARCHE RETENUE

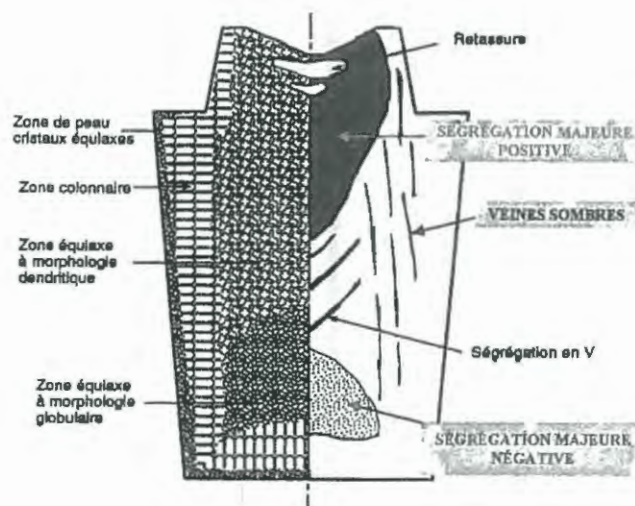
### 2.1. Le sujet technique

Certaines pièces sont fabriquées en utilisant des lingots conventionnels de grande taille qui sont ensuite forgés et usinés pour réaliser les pièces de forges utilisées dans la fabrication des équipements du circuit primaire tels les Générateurs de Vapeur, la cuve et le pressuriseur. Ce processus de fabrication est de nature à pouvoir amener des variations de la composition du matériau dans le volume.

En effet, après coulée et solidification de l'acier, les pièces de grandes dimensions peuvent présenter des variations du point de vue de la composition chimique et des propriétés mécaniques (voir figure ci-dessous). Elles comportent des hétérogénéités macroscopiques correspondant à la ségrégation majeure du carbone, essentiellement, et des autres éléments d'alliage, dans une bien moindre mesure.

Ainsi, d'une manière générale dans ce type de lingot, on trouve en pied de lingot une ségrégation majeure négative (concentration plus faible que la valeur moyenne de la coulée). En remontant du pied vers la tête du lingot, on trouve une évolution de la composition, allant jusqu'à une ségrégation majeure positive en tête de lingot (concentration plus élevée que la valeur moyenne de coulée). Ainsi la zone issue du pied du lingot peut présenter des propriétés mécaniques en traction moins élevées liées à la ségrégation majeure négative du carbone. La zone issue de la partie tête du lingot peut voir sa ténacité affectée par la ségrégation majeure positive (en particulier en carbone).

Aux ségrégations majeures, s'ajoutent des ségrégations locales, dont la présence est systématique sur les très gros lingots en acier faiblement allié au manganèse et au nickel, appelées veines sombres.



Le processus de forgeage qui suit la constitution du lingot ainsi que le programme d'usinage peut éliminer tout ou partie des zones dans lesquelles on a une ségrégation de carbone, qu'elle soit positive ou négative.

Les zones à ségrégation de carbone positive auront tendance à avoir des propriétés de ténacité plus faibles rendant le matériau plus « fragile » au sens des études de rupture brutale. Cet effet sur la ténacité est mesuré industriellement par la mesure de la résilience.

Un second effet potentiel des zones à ségrégation de carbone positive est le potentiel impact du taux de carbone sur la soudabilité des matériaux. L'augmentation du taux de carbone peut conduire à une sensibilité plus importante à la fissuration à froid en zone affectée thermiquement (ZAT) et doit être pris en compte.

Le fait de ne pas avoir de zone à souder en zone de ségrégation de carbone positive permet d'éviter les phénomènes de fissuration à froid en ZAT (Zone Affecté Thermiquement).

Les calottes supérieures et inférieures de la cuve de Flamanville 3 ont été fabriquées sur la base de lingots conventionnels coulés respectivement en 2006 et 2007. Dans le cadre de la qualification technique de ces calottes, réalisée conformément à l'arrêté ESPN réf [1], il a été mis en évidence des valeurs de résiliences inférieures au critère fixé par le point 4 de l'annexe 1 de l'arrêté et des concentrations en carbone caractéristiques d'une ségrégation majeure positive.

Le processus de forgeage des calottes conduit à positionner en partie externe des calottes, la partie macro ségrégée avec un excédent de carbone, comme le montre la Figure 1 ci-dessous représentant les mesures de carbone dans l'épaisseur d'une calotte sacrificielle issue du projet UK.

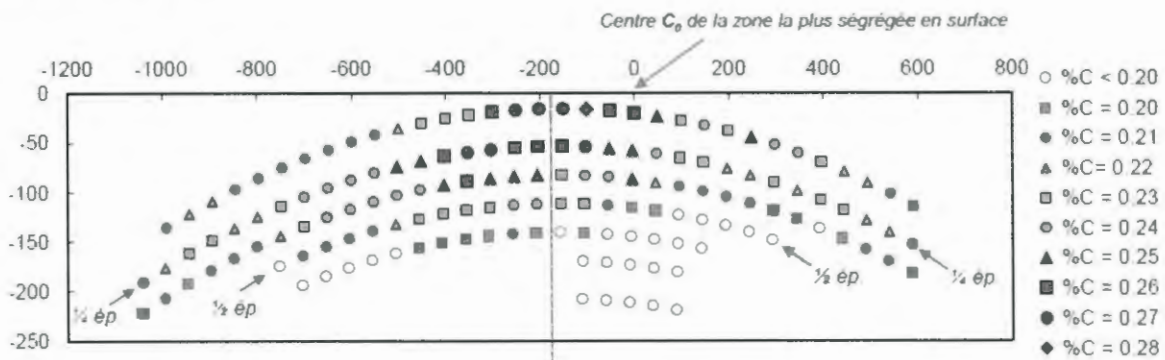


Figure 1 – Cartographie carbone sur la tranche d'une demi calotte UK sup

## 2.2. Démarche initiale

AREVA avait proposé une démarche destinée à justifier la ténacité suffisante du matériau de ces composants dans les zones macro ségrégées, soit principalement centrées sur la moitié externe de l'épaisseur des calottes.

Comme indiqué ci-dessus, les zones à ségrégation de carbone positive auront tendance à avoir des propriétés de ténacités plus faibles rendant le matériau plus « fragile » au sens des études de rupture brutale. Le risque de rupture brutale existe si il y a conjonction de :

- i. La présence d'un défaut nocif (ayant une composante perpendiculaire à la surface du composant),
- ii. Une ténacité du matériau insuffisante,
- iii. Des chargements mécaniques et/ou thermiques importants.

Ainsi, la structure du dossier de justification proposé par Areva avait été structurée en quatre parties :

- Une première partie permettant de préciser les types et tailles de défaut et ainsi de caractériser le point i),
- Une seconde partie synthétisant les résultats du programme d'essais sur des calottes sacrificielles et permettant de caractériser les propriétés mécaniques dans les zones ségréguées, en particulier la ténacité du matériau.

Deux calottes sacrificielles avaient été retenues, une calotte supérieure représentative du couvercle de Flamanville 3, coulée et forgée initialement pour le contrat Hinkley Point (appelé UK sup dans la suite) et une calotte inférieure représentative du fond de cuve Flamanville 3, coulée et forgée initialement pour un contrat aux Etats Unis (appelée UA inf dans la suite).

Parmi ces essais figuraient également des essais de résilience à mi épaisseur sur une carotte prélevée au centre d'une calotte supérieure représentative du couvercle de cuve Flamanville 3, coulée et forgée initialement pour un contrat aux Etats Unis (appelée UA sup dans la suite).

- Une troisième partie, synthétisant les éléments permettant de justifier la représentativité des calottes sacrificielles, vis-à-vis des calottes de la cuve et du couvercle de Flamanville 3 et ainsi la transposabilité des résultats du programme d'essai aux deux calottes de la cuve de Flamanville 3.

La représentativité des calottes sacrificielles vis-à-vis des calottes de Flamanville 3 s'appuyait sur :

- o La cohérence des paramètres chimiques,
- o Le fait qu'à lingot identique, l'étendue de la ségrégation ne dépend que de la gamme de forgeage et de la gamme d'usinage,
- o Le caractère identique des gammes de fabrication,
- o Le positionnement relatif des pièces,
- o La similitude des cartographies de teneurs en carbone en surfaces externes et internes.

Cette deuxième et cette troisième partie permettant de caractériser le point ii)

- Enfin, une dernière partie calcul permettant de définir les caractéristiques mécaniques nécessaires pour démontrer l'aptitude au service des calottes sur la base des chargements mécaniques et/ou thermique importants et un défaut enveloppe (issus de i)), de vérifier que les caractéristiques mécaniques issues de ii) sont supérieures à celles-ci.

La proposition considérait en première approche :

- o les situations de chocs chauds pressurisés, identifiées comme pénalisantes pour la sollicitation d'un défaut présent dans la moitié externe du composant. Il était toutefois indiqué que si l'impact des ségrégations devait dépasser la mi-épaisseur, des compléments devraient être apportés,
- o les situations d'épreuves hydrauliques.

Cette proposition a fait l'objet de la part de l'ASN/DEP et de l'IRSN, d'une instruction formalisée par le rapport réf [2]. Ce dossier a fait l'objet d'un examen par le Groupe Permanent ESPN le 30 septembre 2015 pour ce qui concerne 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 la ténacité suffisante du matériau proposée par AREVA NP et sa méthode de détermination,
- La méthode de détermination de la ténacité minimale du matériau qui repose notamment sur un programme d'essai, 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.

A la suite de la séance, l'ASN a publié la lettre de suite réf [3], dans laquelle elle acceptait, sous réserve de la réponse à quinze demandes, la démarche proposée par AREVA et en particulier la considération d'un programme expérimental réalisé sur deux calottes sacrificielles.

### **2.3. Evolution de la démarche début 2016**

Suite aux premières mesures de carbone à l'intérieur des deux premières pièces sacrificielles, ainsi que les mesures de résilience à mi épaisseur de la calotte supérieure UA, il a été mis en évidence que :

- Malgré la décroissance du taux de carbone au travers de l'épaisseur des calottes, les niveaux de concentration en carbone obtenu à  $\frac{1}{2}$  épaisseur des calottes pouvaient rester suffisants pour conduire à des niveaux de résiliences inférieurs au critère fixé par le point 4 de l'annexe 1 de l'arrêté,
- Une certaine variabilité des niveaux de carbone entre les calottes bien qu'elles aient été fabriquées avec la même gamme de forgeage et d'usinage,
- Les incertitudes des moyens de mesure du taux de carbone devaient être précisées car elles pouvaient avoir une influence sur les analyses du dossier.

Suite à ces constats, AREVA a proposé :

- des compléments et des adaptations de la méthode de justification de la représentativité des calottes sacrificielles,
- l'ajout d'une 3<sup>ème</sup> calotte sacrificielle au programme d'essais plus ségréguée que les deux calottes initialement prévues (une calotte supérieure, coulée et forgée initialement pour un contrat aux Etats Unis),
- l'ajout d'essais à  $\frac{3}{4}$  épaisseur afin de caractériser la matière dans la moitié interne de l'épaisseur des calottes,
- un programme de caractérisation des incertitudes de mesures des deux moyens de mesures Carbone utilisés sur le programme : SEO pour Spectrométrie par Emission Optique à source étincelle, et une seconde destructive de laboratoire dite CIR pour Combustion Infra Rouge.
- Un programme de remesure, avec le même outil et la même procédure optimisée, du taux de carbone en surface des calottes sacrificielles et des calottes de Flamanville 3,
- La mesure en peau interne du carbone dans les calottes sacrificielles,
- L'extension du dossier calculs aux chocs froids pressurisés, situations identifiées comme pénalisantes pour la sollicitation d'un défaut présent dans la moitié interne du composant.

Ces propositions, ainsi que les premiers résultats, ont été présentés au GP ESPN du 24 juin, lequel a précisé, ne pas avoir de commentaires sur l'ajout d'une 3<sup>ème</sup> calotte, ni sur les propositions d'AREVA, visant à étayer le dossier relatif à la représentativité des calottes sacrificielles. Le Groupe Permanent ESPN a par contre recommandé, dans le courrier [5], d'étendre les calculs chocs froids à des défauts en peau interne sous le revêtement, de réaliser des contrôles de type fabrication de la présence de DSR sur le fond intérieur de la cuve de Flamanville 3, et ajouté une recommandation (voir § 5).

### 3. RESULTATS ET ANALYSES

---

Ce paragraphe reprend les quatre parties de la démonstration présentées §2.2 à savoir :

- Les types et tailles de défauts à caractériser,
- Les résultats du programme d'essais mécanique sur calottes sacrificielles,
- La représentativité des calottes sacrificielles vis-à-vis des calottes de FA3,
- L'analyse mécanique et l'évaluation des marges.

#### 3.1. Typologie et Taille de défaut pris en compte

Pour justifier la taille du défaut pris en compte dans le dossier d'analyse mécanique objet du §3.4, l'approche retenue consiste à :

- Définir les défauts susceptibles d'exister dans les calottes en sortie d'usine.  
Une première partie consiste en la réalisation de la méthode dite M2 visant à démontrer la capacité des moyens de contrôle mis en œuvre en fabrication à détecter des défauts de fabrication spécifiés comme inacceptable au titre de la visée qualité,
- Décrire les contrôles complémentaires réalisés sur les calottes dans le cadre de ce dossier de justification,
- Décrire les performances des moyens de contrôle et ainsi définir les dimensions d'un défaut enveloppe,
- Vérifier que les conditions de fonctionnement sur 60 ans ne conduisent pas à amorcer ou propager un défaut.

##### 3.1.1. Défauts inacceptables au sens de la qualité visée et adéquation des moyens de contrôle

L'Annexe 1 (voir paragraphe 7) présente la démarche retenue pour spécifier les défauts inacceptables et vérifier que les contrôles non destructifs mis en œuvre au cours de la fabrication des calottes de cuve sont suffisants pour les détecter. Cette démarche se déroule en 5 étapes :

- Etape 1 : identification des défauts potentiels qui peuvent être générés par les procédés de fabrication mis en œuvre ;
- Etape 2 : identification des parades qui sont mises en œuvre pour supprimer l'apparition des défauts potentiels qui sont identifiés à l'étape 1; ces parades peuvent s'appuyer sur les connaissances industrielles et le retour d'expérience des fabrications antérieures. A ce stade les contrôles non destructifs ne sont pas présentés comme des parades ;
- Etape 3 : définition des défauts spécifiés comme inacceptables au sens de la qualité, à savoir ceux pouvant apparaître compte tenu des parades mises en place à l'étape 2, avec leur critères d'acceptabilité et les justifications associées. Les défauts sont identifiés quantitativement et qualitativement ;
- Etape 4 : vérification que les contrôles effectivement réalisés en fabrication sont bien capables de détecter les défauts inacceptables identifiés à l'étape 3, avec les justifications techniques associées ;
- Etape 5 : si la vérification de l'étape 4 avec les justifications associées n'apportent pas toutes les garanties (performances insuffisantes ou zones non contrôlées), réalisation de contrôles complémentaires ou, si ce n'est pas possible, identification et traitement dans la notice des défauts inacceptables susceptibles de subsister.



La démonstration présentée en annexe 1 conduit aux conclusions suivantes :

- Les Examens Non Destructifs (END) mis en œuvre sur les calottes de Flamanville 3 au cours de leur fabrication selon RCC-M sont suffisants pour détecter l'ensemble des défauts inacceptables d'un point de vue qualité.
- Les défauts inacceptables identifiés dans la démarche sont parallèles à la surface de la pièce, on utilisera dans la suite du document le terme parallèle aux peaux. En d'autres termes, à l'étape 3 de la méthodologie, les caractéristiques propres à la gamme de fabrication, et en particulier le très fort taux de corroyage, conduisent à ne pas pouvoir générer de défaut présentant une composante perpendiculaire aux peaux, les potentiels défauts existants avant emboutissage de la pièce sont « écrasés » par le processus de fabrication.

### 3.1.2. Contrôles complémentaires en peau externe

Au cours du GP ESPN du 30 septembre 2015, les experts ont considéré que les contrôles par ressuage réalisés par AREVA sur la cuve de Flamanville 3 ne permettent pas de s'assurer de l'absence de petits défauts débouchant, désorientés, éventuellement remplis d'oxyde et pouvant présenter une surface lisse. Ce type de défaut n'est pas identifié dans la démarche défaut inacceptable car, pour AREVA, les usinages réalisés sur la pièce conduisent à rendre impossible la présence, sur la pièce finie, de ce type de défaut.

Néanmoins, pour répondre à la demande 1 de la lettre de suite du GP ESPN du 30 septembre 2015 (ref [3]), Areva a réalisé des contrôles complémentaires. La synthèse de ces contrôles est présentée en ref [5], les conclusions en sont reprises ci-dessous pour le couvercle et le fond de cuve de Flamanville 3 :

- ressuage du fond de cuve de Flamanville 3, réalisé après l'opération de meulage visant à éliminer les points de contacts liés à la spectrométrie portative par étincelage,
- magnétoscopie en zone périphérique du couvercle FA3 qui est exempte d'adaptateurs.

Par ailleurs, dans le cadre de la fabrication d'une calotte de couvercle et d'une calotte de fond de cuve pour un contrat EPR aux Etats-Unis, Areva avait réalisé des contrôles magnétoscopiques comme requis par le référentiel ASME. Ces calottes UA inf et UA sup font l'objet d'une démonstration de leur représentativité au § 3.3.

Enfin, conformément aux engagements pris, Areva a répété un contrôle par magnétoscopie et un contrôle par ressuage long sur la calotte UA sup, laquelle a subi une épreuve (avec le corps de cuve de Flamanville 3) depuis le précédent contrôle magnétoscopique.

Les rapports de contrôle associés à ces engagements sont repris en ref [5] et ne font état d'aucune non-conformité. Ces éléments permettent de montrer que les défauts redoutés ne sont pas générés ou sont éliminés par le procédé de fabrication mis en œuvre.

Néanmoins et pour répondre complètement à la demande 1 de l'ASN pour la calotte de fond de cuve de Flamanville 3, AREVA a mis en œuvre un contrôle complémentaire sur le fond de cuve FA3 afin de garantir l'absence de « défauts débouchants de faibles dimensions, désorientés, éventuellement remplis d'oxydes et pouvant présenter une surface lisse ».

La mise en œuvre d'un contrôle par magnétoscopie n'étant pas appropriée pour cette problématique du fait du travail en position plafond, AREVA a proposé la réalisation d'un contrôle par thermographie (Caméra Photothermique Active – CPA). Les raisons de ce choix et la démarche proposée pour justifier des performances de la méthode retenue sont rappelés en ref [5]. AREVA a produit un dossier de justification technique permettant de garantir les performances de la méthode dans le cadre de cette application.

La documentation produite a été transmise à l'organisme APAVE, qui s'est prononcé sur le non-impact de l'opération et a été présent au démarrage de l'inspection, puis au long de l'intervention selon leur programme de suivi.

L'ensemble de la zone ségréguée de la calotte de fond de cuve de Flamanville 3 a été inspectée. Le rapport de fin d'intervention conclut à l'absence d'indication de type redouté. Il met en évidence la présence de 6 indications, de type choc ou rayure qui ne sont donc pas reliés au processus de fabrication. Il a été confirmé que toutes ces indications correspondaient à des indications acceptables selon les critères des contrôles visuels applicables, selon la réglementation, aux équipements N1 de Flamanville 3.

Par ailleurs, début 2017, un complément de justification technique a été réalisé. Il a consisté à fabriquer des maquettes avec défauts remplis d'oxyde en appliquant une méthode de compaction isostatique à chaud. Sur les quatre défauts ainsi implantés dans les maquettes, aucun n'a été détecté par ressuage, 2 sur 4 ont été détectés par ressuage long et 4 sur 4 ont été détectés par contrôle magnétoscopique et par caméra photothermique active, ce complément permet de démontrer sans ambiguïté la pertinence du moyen de contrôle CPA pour détecter les défauts recherchés.

Ainsi il peut être conclu que les calottes de Flamanville 3 ne présentent pas de petits défauts débouchants, désorientés, éventuellement remplis d'oxyde et pouvant présenter une surface lisse. Les conclusions du paragraphe 3.1.1 ci-dessus restent donc applicables.

### 3.1.3. Performance des moyens de contrôle et définition d'un défaut enveloppe

Les résultats d'études présentés précédemment permettent de conclure que les procédés de fabrication mis en œuvre ne peuvent générer de défauts avec une orientation perpendiculaire aux peaux.

Néanmoins, dans le cadre de l'étude réalisée ici, les performances du contrôle par ultrasons tels que requis par le référentiel technique ont fait l'objet d'une analyse afin d'évaluer leur performance au regard de la détection d'un défaut de type plan non débouchant qui serait orienté perpendiculairement aux peaux (contrôle volumique). Les détails sont présentés en Annexe 2, une synthèse des résultats est reprise ici.

De façon conservatrice, pour les défauts plans enfouis perpendiculaires aux peaux, et ce quelle que soit leur position dans l'épaisseur, les dimensions garantissant la détectabilité sont une hauteur de 10 mm et une longueur de 20 mm. A noter que par ailleurs, des résultats de simulation ont montré qu'un défaut plan de hauteur minimale de 5 mm est notable pour une distance entre la peau externe et le défaut n'excédant pas 20 mm (effet de coin toujours existant).

Ces informations concernent des défauts « rugueux », la situation étant différente pour des défauts du même type mais « lisses » : les conclusions restent les mêmes tant que la distance entre la peau externe et le défaut n'excède pas 20 mm, au-delà la détection ne peut plus être garantie comme indiqué en référence [2].

En conclusion, sur la base de ces éléments, la donnée d'entrée à considérer pour les analyses mécaniques est le postulat d'un défaut plan perpendiculaire à la peau de hauteur 10mm et longueur 20mm.

### 3.1.4. Contrôles de défaut en peau interne

Comme rappelé au §2.1 un second effet potentiel des zones à ségrégation de carbone positive est le potentiel impact du taux de carbone sur la soudabilité des matériaux. L'augmentation du taux de carbone peut conduire à une sensibilité plus importante à la fissuration à froid en zone affectée thermiquement (ZAT) qui doit être pris en compte.

Les précautions prises à la conception, et traduite dans les gammes de forgeage, visent à éloigner la ségrégation positive de la peau interne des calottes afin d'éviter ce phénomène lors des opérations de soudage du revêtement.

Pour se prémunir de l'apparition de défaut type Fissuration à Froid (FAF) les revêtements ont été réalisés en appliquant la méthode dite du « tout à chaud » imposées dans les fiches de modes opératoire de soudage et reprises dans les gammes de fabrication pour garantir l'élimination de l'hydrogène résiduel, soit :

- préchauffage entre 150 et 180°C
- post chauffage entre 250 et 400°C
- Interdiction de revenir à l'ambiante en cours de revêtement avant de réaliser un post chauffage.

Pour se prémunir de l'apparition de défaut type Décohésion Inter granulaire Due Réchauffage (DIDR) les revêtements ont été réalisés en respectant les impositions, de recouvrement et/ou chevauchement entre passes et/ou couches, spécifiées dans les fiches de modes opératoire de soudage et reprises dans les gammes de fabrication. Ces mesures ayant pour finalité de supprimer les zones à gros grains en ZAT sous revêtement en garantissant une régénération de toute la ZAT de la couche précédente par la couche suivante

Par ailleurs, les essais réalisés à  $\frac{3}{4}$  épaisseur depuis la peau externe (cf § 3.2.3), les mesures de carbone dans l'épaisseur, ainsi que les mesures carbone réalisées en peau interne montrent que le taux de ségrégation décroît rapidement dans la moitié interne de l'épaisseur et permettent de se prémunir du risque de fissuration à froid.

Néanmoins, au titre de la défense en profondeur, la réalisation d'un contrôle US d'absence de défaut sous revêtement apparaît recommandée. Ce contrôle a été réalisé pour le couvercle de la cuve de Flamanville 3 au cours de la fabrication de ce composant, le procès-verbal de ce contrôle est repris en réf [5]. Il ne met en évidence aucun défaut notable.

Pour le fond de cuve, conformément à la demande n°2 de la lettre de suite du GP ESPN du 24 juin (réf [5]) et à la proposition faite par Areva, un contrôle a été réalisé sur site au mois de décembre. Il ne met en évidence aucun défaut notable.

### 3.1.5. Potentialité de défaut en exploitation

En exploitation, les conditions de fonctionnement peuvent conduire soit à amorcer, ou en d'autres termes à créer des défauts, soit à propager, c'est-à-dire à agrandir, des défauts de petite taille inférieure à la performance des moyens de contrôle mis en œuvre en fabrication donc jugés comme acceptable en sortie usine.

L'amorçage peut apparaître à la suite de deux phénomènes, la fatigue ou la corrosion.

La fatigue du matériau est liée aux sollicitations cycliques que subit le matériau. On entend ici par sollicitations, des variations significatives de déformation ou de contrainte, liées aux variations de pression et températures lors du fonctionnement normal de la chaudière. Ces sollicitations cycliques peuvent créer un endommagement puis une fissure en surface.

Pour les calottes, le risque d'amorçage en fatigue est évalué dans le DAC au travers du facteur d'usage en fatigue. Pour les calottes inférieure et supérieure, le facteur d'usage enveloppe est obtenu au coin de l'alésage du tube central et vaut  $F_{u_{max}} = 0.02$ . Compte tenu de cette très faible valeur, aucun amorçage en fatigue n'est redouté.

La corrosion est un processus de dégradation chimique en surface lors d'une exposition à l'environnement.

Pour les calottes de cuve côté externe, qui sont calorifugées, un seul mécanisme de corrosion est envisageable, la corrosion généralisée. En effet, la peau externe des calottes est uniquement exposée à l'air du bâtiment réacteur, qui est en atmosphère contrôlée, exempte de polluants. De plus, la température en fonctionnement de la calotte en peau externe est suffisamment élevée pour empêcher la condensation en surface de l'acier.

Cette corrosion est très faible puisque la perte métallique enveloppe sur la durée de vie de la tranche est estimée à moins de 100  $\mu\text{m}$  pour une classe de corrosivité C1 correspondant à l'atmosphère dans le bâtiment réacteur (cf. normes ISO 9223 et ISO 9224 de 2012).

Concernant les autres types de dégradation :

- Les phénomènes de corrosion sous calorifuge sont exclus du fait de la mise en propreté des équipements qui garantissent l'absence d'espèces nocives au contact du métal.
- la corrosion localisée (piqûration, formation de crevasse) est exclue du fait de l'absence en service d'espèces susceptibles d'initier de tels phénomènes,
- la corrosion sous contrainte est exclue du fait de la non-exposition à un fluide liquide, couplée à l'absence de sollicitation côté externe des calottes.

Les surfaces internes en acier au carbone des calottes, étant revêtues d'alliage inoxydable (acier inoxydable austénitique ou alliage base nickel), aucune corrosion n'est attendue. En particulier ces matériaux en contact ayant des potentiels de corrosion voisins, la corrosion galvanique n'est pas envisageable.

Ainsi aucun amorçage n'est redouté du fait de la corrosion.

Par ailleurs, vis-à-vis de la propagation, l'analyse de la possibilité d'amorçage en fatigue de tout défaut en peau externe de hauteur 10 mm (cf. §3.4.1) conduit à un facteur d'amorçage  $F_a = 0$  à l'exception du coin d'alésage central (défaut D11, cf. §3.4.1). La propagation suivant cet amorçage reste cependant très faible (de l'ordre de 0,8 mm sur 60 ans).

Ainsi, il n'est pas redouté de phénomène qui conduirait à propager en exploitation, un petit défaut qui serait passé sous les performances des moyens de contrôle en fabrication.

### 3.1.6. Conclusion

- En ce qui concerne les défauts en peau externe ou dans l'épaisseur des calottes :
  - Les calottes de cuve de par leur processus de fabrication et le taux de corroyage associé ne présentent pas, en sortie usine, de défaut nocif perpendiculaire aux peaux.
  - En exploitation, il n'existe pas de phénomène pour les calottes susceptible de conduire à l'apparition d'un défaut nocif.

Les contrôles complémentaires en peau externe ont par ailleurs permis de confirmer l'absence de défaut de surface ou de sub surface de type petits défauts débouchant, désorientés, éventuellement remplis d'oxyde et pouvant présenter une surface lisse.

- ⇒ Dans la suite du dossier on postulera de manière conservative et découplée des conclusions de ce paragraphe, un défaut perpendiculaire à la peau dans les analyses mécaniques. Ce choix réalisé pour les calculs constitue un conservatisme majeur (cf. §3.4.8.2).
- La performance des moyens de contrôle permet de garantir qu'un défaut perpendiculaire aux peaux de 10 x 20 mm aurait certainement été détecté au cours de la fabrication
- En exploitation les effets de corrosion, de fatigue ou de propagation ne remettent pas en cause cette conclusion

➤ En ce qui concerne les défauts sous revêtement :

Les essais réalisés à  $\frac{3}{4}$  épaisseur depuis la peau externe (cf §3.2.3), les mesures de carbone dans l'épaisseur, ainsi que les mesures carbone réalisées en peau interne montrent que le taux de ségrégation décroît rapidement dans la moitié interne de l'épaisseur et permettent de se prémunir du risque de fissuration à froid.

Le contrôle réalisé en usine sur le couvercle de cuve et sur le fond de cuve fin 2016 ont permis de le confirmer.

### 3.2. Caractéristiques mécaniques des calottes sacrificielles

La note en ref [7] présentent la démarche, l'ensemble des résultats d'essai et les analyses associées sur les zones de recette des calottes de cuve de Flamanville 3 et des calottes sacrificielles ainsi que les résultats d'essai dans les zones ségréguées des trois calottes sacrificielles UK sup, UA inf et UA sup. Le paragraphe qui suit en reprend les principales conclusions, les figures et tableaux présentés en sont également issus.

#### 3.2.1. Le programme d'essai

Les essais, à l'exception des essais Pellini, ont été réparties sur trois laboratoires tous accrédités ISO 17025. Le Tableau 1 ci-après reprend la liste des essais et leur répartition par laboratoire.

Tests	Tempé Rature	FA3 INF	FA3 SUP	UK SUP		UA INF				UA SUP				TOTAL Par type d'essai	
		Recette	Recette	Recette	Seg. 1/4 ép.	Seg. 1/2 ép.	Recette	Seg. 1/4 ép.	Seg. 1/2 ép.	Seg. 3/4 ép.	Recette	Seg. 1/4 ép.	Seg. 1/2 ép.		Seg. 3/4 ép.
Charpy (transition)	Variable (dont 0°C)	18	18	18	72	52	18	36	36	36	18	36	36	36	430
Charpy (RTNDT)	Fonction de TNDDT	-	-	-	2 x 12	2 x 12	-	12	12	12	-	2 x 12	2 x 12	12	144
CT25	50°C & 330°C	6	6	6	12	8	6	9	9	9	6	10	10	10	107
CT12.5	variable	40	40	48	144	84	38	72	72	48	20	74	72	48	800
Traction (interprétation CT25)	50°C & 330°C	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	136+9 en peau
Traction	Ambiante	/	/	/	3	3	/	3	3	3	/	3	3	3	
Traction (interprétation CT12.5)	variable	6	6	6	14	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
PELLINI	variable	-	-	-	2 x 8	2 x 8	-	8	8	8	-	2 x 8	2 x 8	8	96
Total par zone (hors analyses chimiques)		72	72	80	287	195	70	148	148	124	52	171	169	125	1722
Nombre d'analyses chimiques		18	18	74	286	193	19	143	147	122	17	167	169	121	1503

AREVA St Marcel	AREVA Erlangen	SCK-CEN (Mol)	AMEC
--------------------	-------------------	------------------	------

**Tableau 1 : - synthèse du programme d'essai**

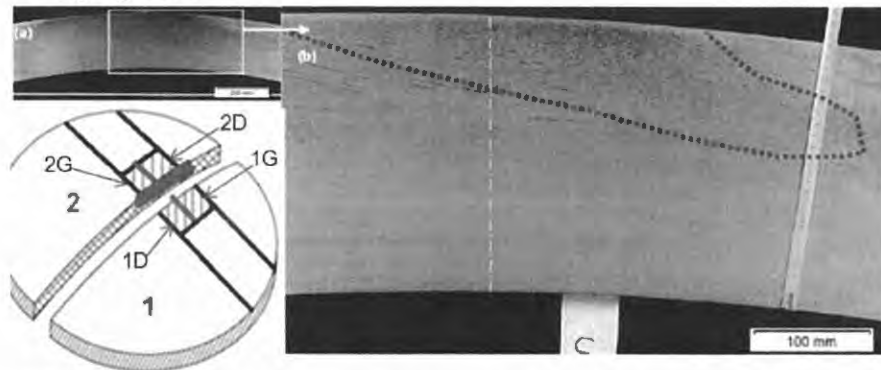
Les essais Pellini ont été réalisés à l'usine Areva de St Marcel.

Les essais de ténacité ont été menés conformément à la procédure ASTM E1921-13 avec des éprouvettes CT d'épaisseur 12.5.

La sélection des zones les plus ségréguées dans les calottes sacrificielles a suivi le même processus :

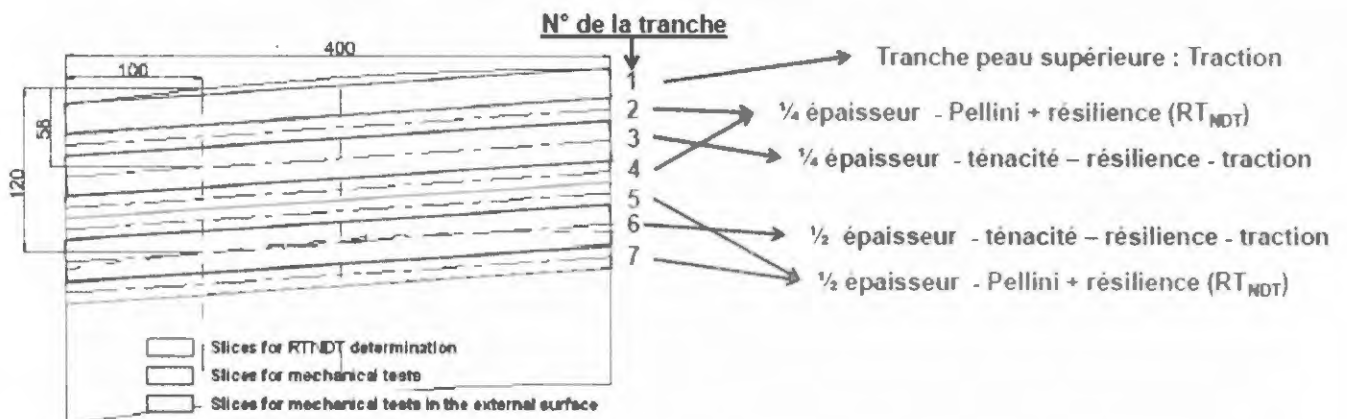
- Cartographie carbone de surface par méthodologie SEO (cf §3.3.3.1) afin de définir un axe de découpe,

- Cartographie carbone et macrographie sur la coupe d'une demi-calotte afin de localiser la ségrégation.



**Figure 2 - identification de la zone macro ségrégée dans l'épaisseur de la pièce - ex/ de la calotte UK sup**

- Prélèvement de 4 blocs de 400 x 400 mm dans la zone ségrégée (2G, 2D, 1G, 1D ci-dessus),
- Découpe de chacun des quatre blocs en tranches au 1/4 et à la 1/2 épaisseur. Pour UA sup et UA inf, le 3/4 épaisseur a également été analysé.



**Figure 3 - Découpe des tranches dans les blocs issus de la macroségrégation positive (ex/ de UK sup)**

- Les tranches font ensuite l'objet d'une cartographie carbone par une méthode de mesure par combustion de copeau (CIR) (cf § 3.3.3.1)

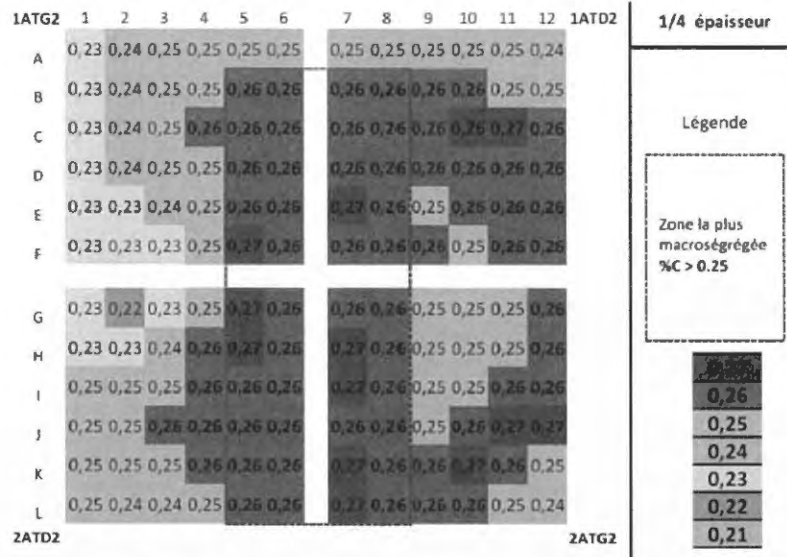


Figure 4 – Localisation de la macroségrégation positive au quart épaisseur dans la calotte supérieure UK sup

- Définition d'un plan de prélèvement à partir de ces cartographies carbone

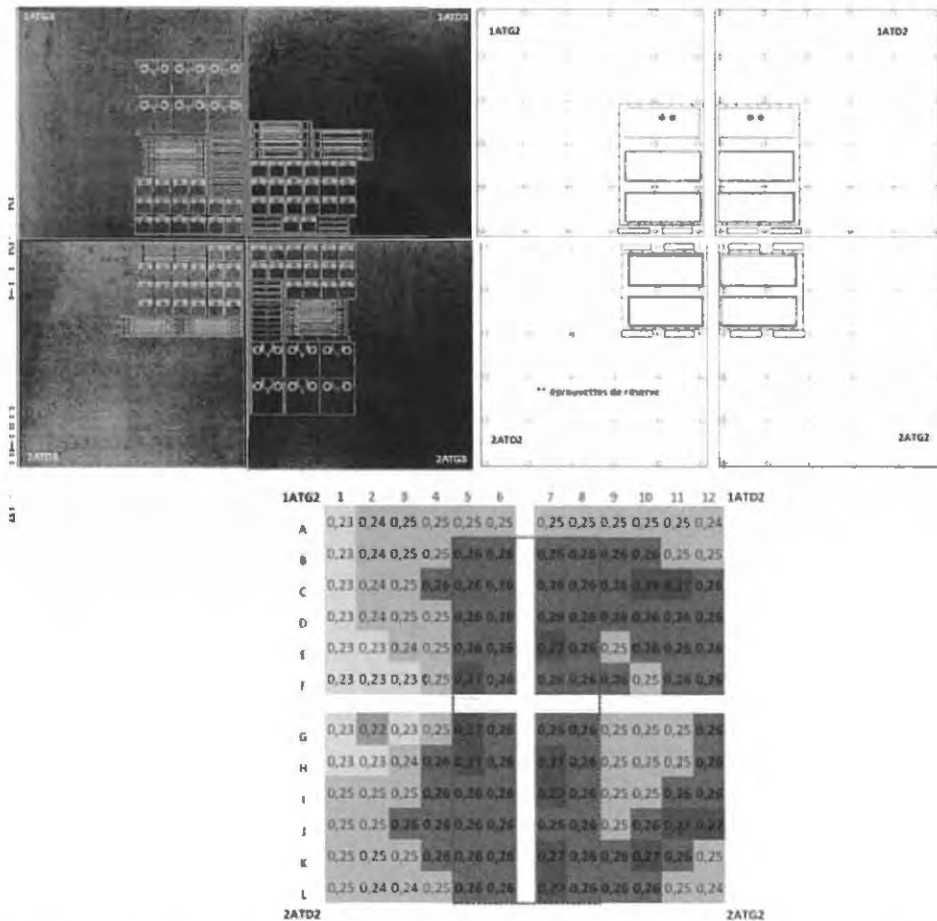


Figure 5 – plan de prélèvement à quart épaisseur de la calotte UK sup (tranche 2 et tranche 3)

N  
ECCN:  
AL: 0E001



Chacune de ces étapes a fait l'objet d'un point d'arrêt avec l'ASN qui a levé ces points d'arrêt qu'après analyses des éléments transmis par Areva.

L'ensemble des essais, des phases de découpe et de caractérisation de la position des ségrégations, ont été suivie par un organisme notifié mandaté par l'ASN qui a en suivi toutes les étapes et en particulier, le marquage des pièces et des éprouvettes.

### 3.2.2. Caractéristiques mécaniques en zone de recette

Les essais ont été réalisés au  $\frac{1}{4}$  épaisseur des coupons de recette des deux calottes de cuve de Flamanville 3 et des trois calottes sacrificielles. On peut noter que ce positionnement diffère légèrement du positionnement  $\frac{1}{4}$  épaisseur au stade TTQ des essais de recette du Rapport de Fin de Fabrication.

#### i) Essais de traction

Les essais de tractions ont mis en évidence une très bonne corrélation entre les caractéristiques de  $R_{p0.2}$  et  $R_m$  en fonction de la température et les courbes de la littérature. Les résultats sont cohérents entre les calottes, aucune ne se démarque.

#### ii) Essais de résilience

Comme le montre la figure ci-dessous :

- Les cinq calottes présentent une transition comparable, avec un écart de l'ordre de 25°C entre les courbes extrêmes.
- Les cinq calottes présentent un palier ductile élevé, avec également peu de variabilité entre les calottes (Kv palier ductile variant de 213 à 225 J).

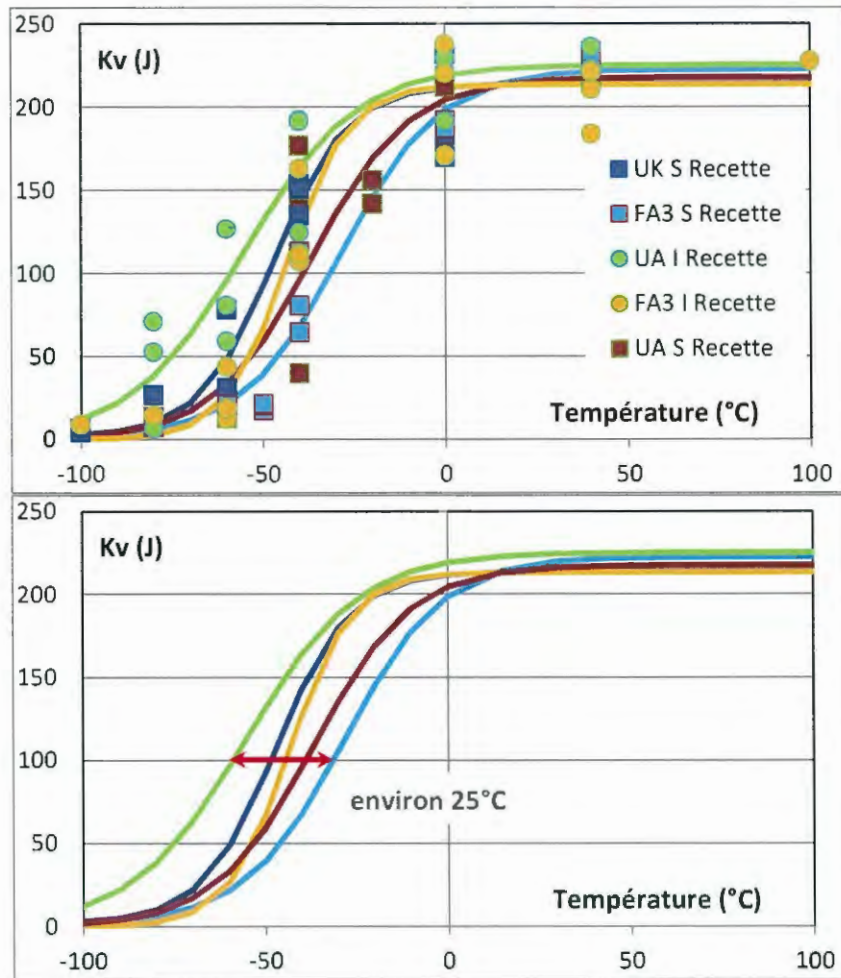


Figure 6 : Courbes de transition en zone de recette

iii) Essais de ténacité

Le tableau ci-dessous synthétise les résultats des essais de ténacité dans les calottes identifiées en donnant, la valeur de  $T_0$ , la valeur d'indexation de la courbe ZG 'optimale' enveloppe des points, ainsi que la  $RT_{NDT}$  issu des essais Pellini du Rapport de Fin de Fabrication (RFF).

Calotte	UK S	FA3 S	UA I	FA3 I	UA S
Nombre d'essais	48	40	38	40	16
$RT_{NDT}$ (°C)	-45	-30	-30	-20	-35
Indexation courbe ZG 'optimale' (°C)	-96	-75	-133	-109	-132
$T_0$ (°C)	-115	-94	-134	-126	-126

Tableau 2 : Synthèse des résultats de ténacité dans le domaine de la transition pour les zones de recette

L'analyse des valeurs obtenues pour la température de référence  $T_0$  montre que :

- Les calottes inférieures semblent présenter une température de transition plus basse, certainement liée à l'épaisseur à la trempe plus faible pour ces pièces par rapport aux calottes supérieures,
- Les valeurs de  $T_0$  obtenues sont très bonnes, en particulier pour les calottes inférieures qui présentent des valeurs extrêmement basses,
- La marge entre les valeurs de ténacité réelle mesurées et la  $RT_{NDT}$  issue des mesures Pellini est importante. Ces derniers sont des mesures indirectes et conservatives qui ne permettent pas de caractériser précisément la capacité du matériau à résister à l'amorçage en rupture fragile en présence de défaut de type fissure. Ce conservatisme est typiquement admis comme permettant de couvrir dans une certaine mesure les hétérogénéités de la pièce.
- L'ensemble des valeurs mesurées est dans la gamme typique d'un matériau de cuve.

### 3.2.3. Caractéristiques des zones ségréguées dans le domaine fragile

#### 3.2.3.1. Propriétés de traction

	UK S 1/4	UK S 1/2	UA I 1/4	UA I 1/2	UA I 3/4	UA S 1/4	UA S 1/2	UA S 3/4
Décalage $R_{p0.2}$ (MPa)	51	30	30	13	0	55	47	21
Décalage $R_m$ (MPa)	67	39	56	33	0	74	58	30

**Tableau 3 : Décalage sur les caractéristiques de traction entre zones ségréguées et zones de recette.**

La ségrégation positive conduit logiquement à une augmentation de ces propriétés. Pour une caractéristique donnée et une zone ségréguée donnée, il apparaît que l'évolution avec la température se déduit simplement de celle obtenue en zone de recette par un décalage en contrainte, déduit des essais effectués à 330°C. Les décalages estimés sont synthétisés dans le Tableau 3.

#### 3.2.3.2. Caractéristiques de résilience

La comparaison des courbes de résilience obtenues en zone ségréguée avec les zones de recette montre une légère baisse du palier ductile, un décalage de la courbe vers les plus hautes températures et une pente plus faible pour les zones ségréguées.

En zones ségréguées, les pentes sont comprises entre 1,35 et 2,2, ce qui s'avère cohérent avec le retour d'expérience des ségrégations positives des plaques tubulaires où ce ratio est considéré compris entre 1,5 et 2. Ce point est important, car cette fourchette avait été utilisée initialement pour anticiper les valeurs de T68J et TCV à partir des mesures de résilience effectuées à 0°C sur la carotte de la calotte supérieure UA (repris en annexe 3).

<b>Pente max (J/°C)</b>	1,48	1,79	1,7	2,17	1,36	1,56	5,47	3,42
<b>Plateau ductile (J)</b>	185	196	187	181	176	172	225	213

**Tableau 4 : Caractérisation des courbes de transition obtenues par essais de flexion par choc**

### 3.2.3.3. Caractéristiques de ténacité dans le domaine de la transition

La réalisation des essais de ténacité sur éprouvettes CT12.5 a permis de caractériser plus finement la transition fragile-ductile des zones ségréguées. Entre 72 et 144 essais ont été réalisées, pour chaque calotte, à chaque niveau, dans les zones fortement ségréguées afin de caractériser au mieux les distributions de ténacité à rupture, en particulier sur le haut de la transition. Ce domaine a été défini à partir de la température de référence  $T_0$  déterminée pour chaque zone d'intérêt avec un focus des essais entre  $T_0$  et  $T_0+60^\circ\text{C}$ . A l'issue du programme, pour chaque zone d'intérêt, la température d'indexation 'optimale' de la courbe ZG 6110 est déterminée.

Le Tableau 5 résume les résultats obtenus.

Les températures de référence  $T_0$  obtenues s'avèrent assez homogènes entre les zones ségréguées et, malgré les fortes teneurs en carbone, sont encore représentatives d'une bonne ténacité dans le domaine de la transition.

De plus, les distributions de ténacité à rupture obtenues dans les zones ségréguées s'avèrent cohérentes avec celles obtenues en zone de recette et la distribution théorique de l'approche Master Curves. L'impact de la ségrégation sur les distributions se traduit pour l'essentiel par une translation vers les plus hautes températures par rapport aux résultats obtenus en zones de recette.

<b><math>T_0</math> (°C)</b>	-63	-64	-71	-66	-85	-54	-50	-85
<b>RT<sub>T0</sub> pénalisée (°C)</b>	-24	-25	-32	-27	-46	-15	-11	-42
<b>T d'indexation optimale (°C)</b>	-27	-39	-32	-31	-63	-30	-21	-62
<b>TCV-33°C (°C)</b>	-13	-28	-28	-28	-53	-3	-3	-33
<b>T<sub>NDT</sub> (°C)</b>	0	-5	-5	0	-10	5	5	0

**Tableau 5 : Caractérisation de la transition en zone ségréguée**

Il faut également souligner la cohérence dans le Tableau 5 pour l'ensemble des zones ségréguées entre :

- La température d'indexation optimale,
- La température d'indexation déduite de  $T_0$  proposée dans la note [7], désignée par  $RT_{T_0}$  pénalisée,
- La température (TCV-33°C).

La  $T_{NDT}$  s'avère plus élevée : tout comme en zone de recette, on observe donc un décalage souvent important entre la température d'indexation adaptée pour représenter la ténacité du matériau et la  $T_{NDT}$ .

	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Décalage T68J (°C)</b>	50	41	57	58	31	58	52	34
<b>Décalage <math>T_0</math> (°C)</b>	52	51	63	68	49	72	76	41
<b>Décalage <math>RT_{NDT}</math> (°C)</b>	45	40	25	30	20	40	40	35

**Tableau 6 : Evaluation de l'impact de la ségrégation sur le domaine de la transition fragile-ductile**

L'impact de la macro-ségrégation positive est évalué en comparant ces grandeurs à celles obtenues en zone de recette (voir Tableau 6) :

- Il faut d'abord souligner la cohérence entre le décalage T68J déduit des courbes de résilience avec celui obtenu sur les températures de référence  $T_0$ , ce dernier apparaissant cependant en général légèrement supérieur. Cette cohérence a permis d'anticiper l'impact de la ségrégation sur les propriétés de ténacité à partir des essais Charpy,
- Sur les essais de ténacité, la valeur du décalage en  $T_0$  s'avère cohérent avec la valeur de la teneur moyenne en carbone des calottes,
- Malgré une baisse de la teneur en carbone à mi-épaisseur des zones ségréguées par rapport au quart-épaisseur, les propriétés de ténacité n'évoluent pas (les courbes de transition obtenues par essais de résilience se superposent). Ce résultat est a priori associé à l'effet de trempe qui est le plus défavorable à proximité de la mi-épaisseur,
- Sous la mi-épaisseur, la teneur en carbone continuant à baisser et l'effet de trempe étant moins défavorable, les propriétés de ténacité s'améliorent.

Lorsque la  $RT_{NDT}$  de recette est retenue pour indexer la courbe ZG6110 du RCC-M, il apparait qu'elle permet d'envelopper les résultats de ténacité obtenus en zone ségréguée de la calotte inférieure UA. Pour la calotte supérieure UK et la calotte supérieure UA, pour chaque altitude considérée dans la zone ségréguée, seuls quelques essais ne sont pas couverts par la  $RT_{NDT}$  de recette :

- Pour UK Sup : 5 sur 144 essais au  $\frac{1}{4}$  épaisseur et 3 sur 84 essais à  $\frac{1}{2}$  épaisseur).
- Pour UA Sup : 1 sur 74 essais au  $\frac{1}{4}$  épaisseur et 4 sur 72 essais à  $\frac{1}{2}$  épaisseur).

Au  $\frac{3}{4}$  épaisseur des zones ségréguées, l'ensemble des points est couvert par la  $RT_{NDT}$  de recette. Ainsi, la comparaison des résultats des essais de ténacité (614 essais) avec la courbe du code indexé avec la  $RT_{NDT}$  de recette montre que la grande majorité des points (601 essais – 98%) sont couverts.

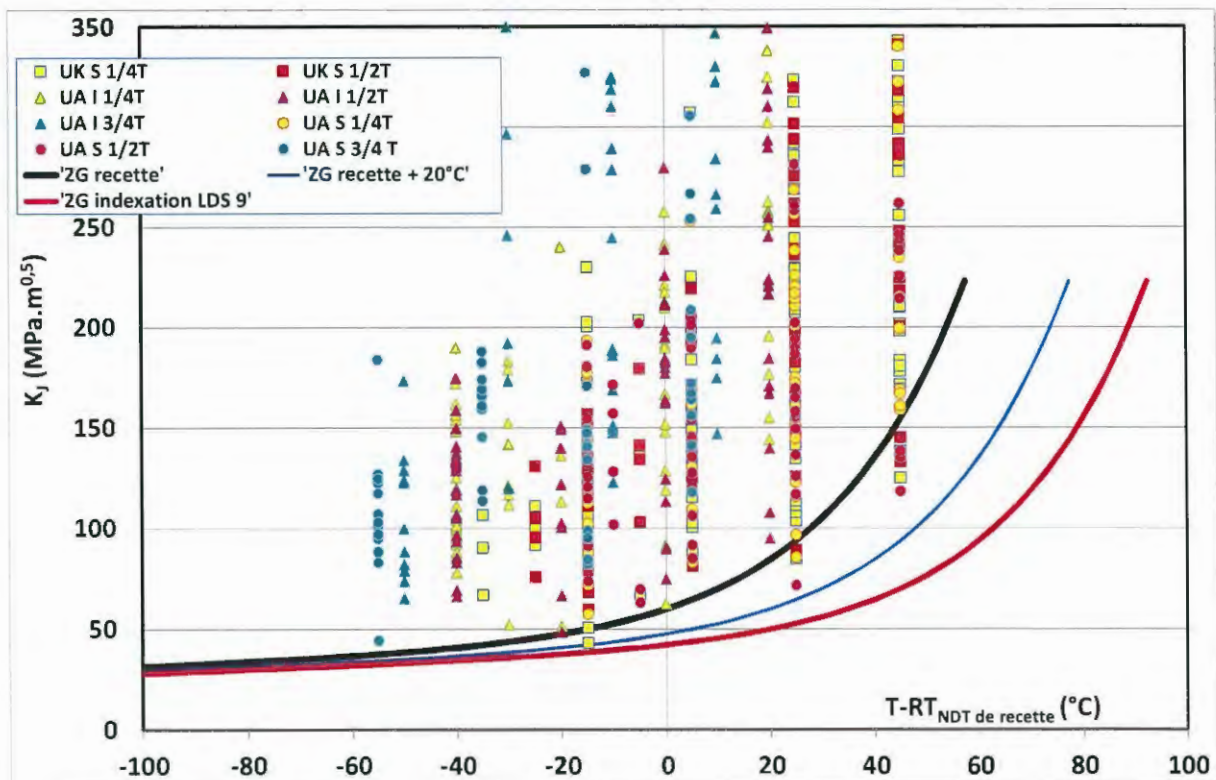
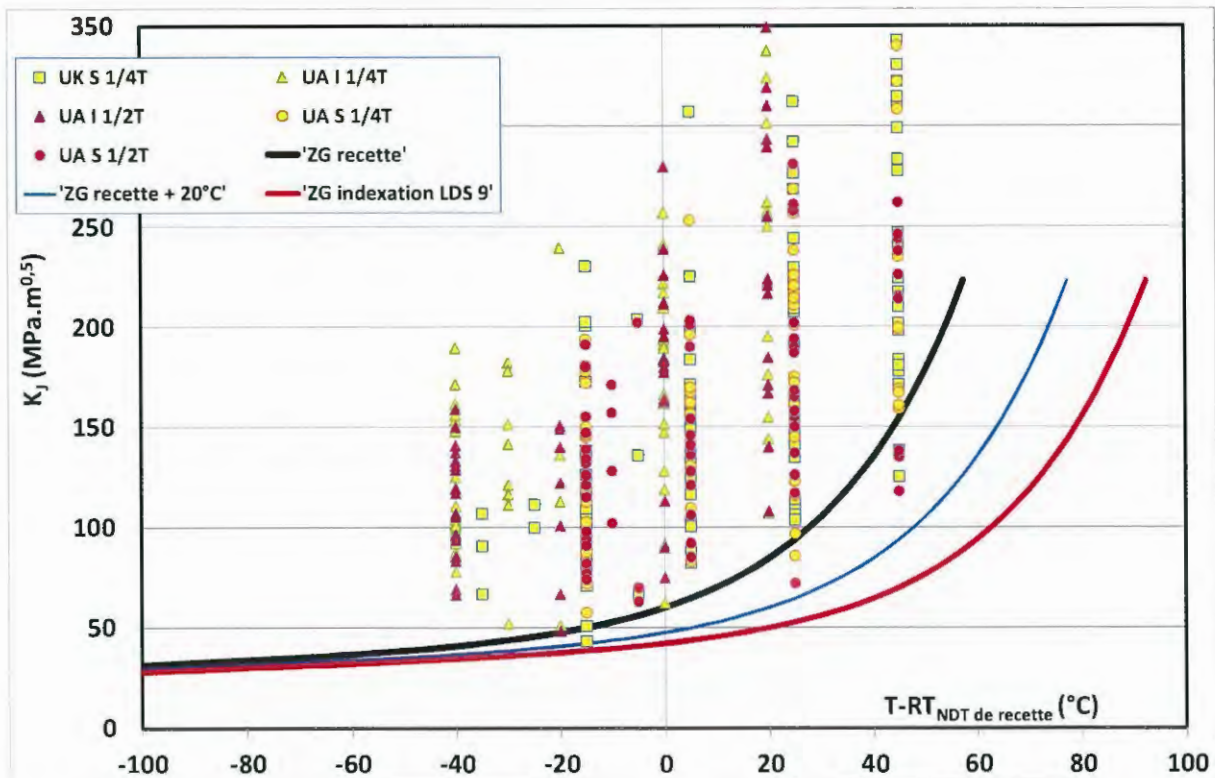


Figure 7 : Comparaison des essais de ténacité avec la courbe ZG indexée par la  $RT_{NDT}$  de recette.

AL: 0E001 ECCN: N

Si on se limite aux éprouvettes présentant une teneur en carbone supérieure ou égale à 0,25%, la population représente 394 éprouvettes (voir Figure 8); 117 au ¼ épaisseur de la calotte supérieure UK, 71 au ¼ épaisseur, 59 à ½ épaisseur de la calotte inférieure UA, 74 au ¼ épaisseur et 72 à ½ épaisseur de la calotte supérieure UA). Sur cette population, 9 essais ne sont pas couverts par la  $RT_{NDT}$  de recette :

- Pour UK Sup : 4 essais au ¼ épaisseur.
- Pour UA Sup : 1 essai au ¼ épaisseur et 4 essais à ½ épaisseur.



**Figure 8 : Comparaison des essais de ténacité avec la courbe ZG indexée par la  $RT_{NDT}$  de recette pour les éprouvettes dont la teneur en carbone est supérieure ou égale à 0,25%**

La marge implicite contenue dans cette température (et illustrée dans le chapitre 2 de la note [7] pour les 5 calottes testées) permet de couvrir de manière général l'ensemble d'une pièce. Pour les zones ségréguées des calottes EPR, cette marge s'avère insuffisante, mais de peu (voir Figure 7 et Figure 8).

Un décalage de la  $RT_{NDT}$  de recette de 20°C permet de couvrir l'ensemble des essais de ténacité dans le domaine de la transition du programme sacrificiel. Ce point est essentiel pour évaluer la situation réelle dans le traitement du risque de la rupture brutale, qui est finalement imposée par la ½ épaisseur de la calotte supérieure UA : la différence entre l'indexation 'idéale' des essais de ténacité et la  $RT_{NDT}$  de recette est de 14°C. De manière enveloppe, si nous retenons la  $RT_{T_0}$  pénalisée ou (TCV-33°C), c'est un décalage maximum de 32°C par rapport à la  $RT_{NDT}$  de recette qui est constaté. La pénalisation de la  $RT_{NDT}$  de recette spécifiée (-20°C) de 70°C prise dans les calculs apparaît donc très sévère.

### 3.2.3.4. Relation entre ténacité /carbone / effet de trempe

A partir des calculs thermiques des conditions de trempe de chaque calotte réf. [8], la vitesse de refroidissement aux différentes positions des zones ségréguées a été estimée en fonction des usinages spécifiques à chaque calotte. Le Tableau 7 synthétise les résultats.

Il apparaît que la ½ épaisseur des deux calottes supérieures présente une vitesse de trempe plus faible que les autres zones. Par contre, l'effet de trempe apparaît comparable pour les ¼ épaisseur des 3 calottes et la ½ épaisseur de la calotte inférieure UA (vitesses entre 1300 °C/h et 1400 °C/h). Les zones de recette, située au ¼ épaisseur, sont supposées présenter une vitesse de trempe comparable.

¼ épaisseur (°C/h)	1322	1386	1354
½ épaisseur (°C/h)	1022	1302	1058
¾ épaisseur (°C/h)	1277	1414	1388

Tableau 7 : Evaluation des vitesses de refroidissement lors de la trempe des calottes.



Evolutions en fonction de la teneur moyenne en carbone

Evolutions en fonction de la teneur maximale en carbone

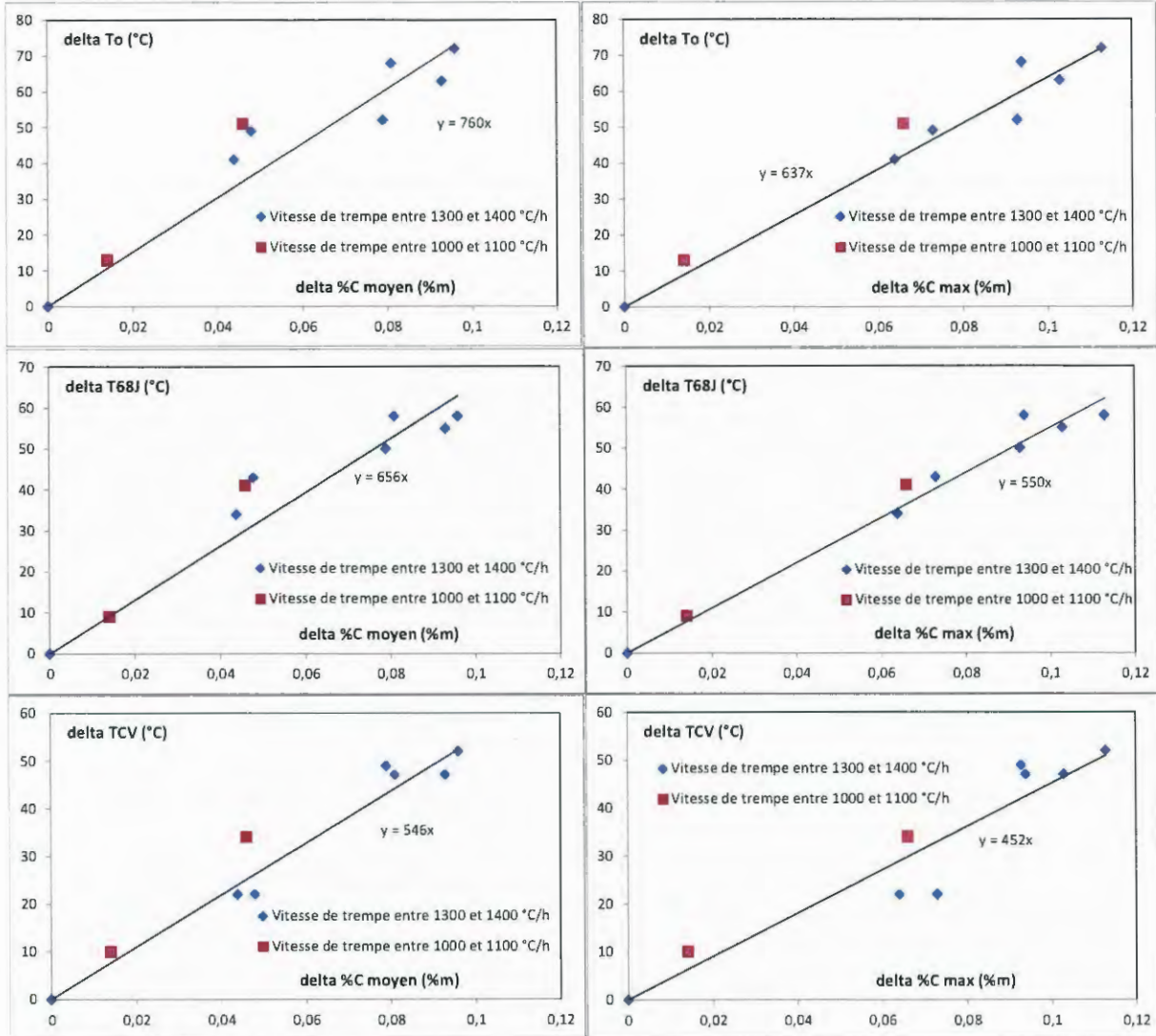


Figure 9 : Evolution des décalages de T<sub>0</sub>, T<sub>68J</sub> et TCV entre zones ségréguées et zone de recette en fonction de la teneur en carbone.

La Figure 9 présente les décalages des différentes températures d'indexation en fonction de la différence des teneurs moyennes ou maximales en carbone entre la zone d'intérêt et la zone de recette. Pour les zones de recette, le nombre d'essais de résilience étant insuffisant pour déterminer avec précision la température TCV, nous avons estimé l'écart moyen entre TCV et T68J sur les zones ségréguées et reporté cet écart sur la T68J déduites des courbes de transition en zone de recette. Pour l'ensemble des populations de points, il apparaît qu'une corrélation linéaire permet de fournir une bonne tendance des évolutions. De plus, il apparaît que les décalages pour les zones où la vitesse de trempe est entre 1000°C/h et 1100°C/h sont bien supérieure à ceux obtenus pour les zones présentant une vitesse de trempe plus rapide.

Cependant, il paraît pertinent de retenir la différence des valeurs moyennes et non celles des valeurs maximales compte tenu des variations plus ou moins importantes constatées pour les différentes zones.

Le Tableau 8 synthétise les pentes obtenues permettant d'estimer le décalage en fonction de la teneur de carbone (plus exactement différence des teneurs en %C entre zone d'intérêt et zone de recette).

Température	T <sub>0</sub>	T68J	TCV
Pente (°C / %m)	760	656	546

**Tableau 8: Evaluation de l'impact de la teneur en carbone sur la transition fragile-ductile**

### 3.2.3.5. T<sub>NDT</sub> en zone ségrégée

Les essais Pellini ont été réalisés à l'usine de Saint Marcel pour l'ensemble des zones ségrégées. L'ensemble des résultats s'avère très cohérent avec une très faible variabilité entre calottes pour la zone comprise entre la tête et la ½ épaisseur. La T<sub>NDT</sub> obtenue varie entre -5°C et 5°C. Il y a donc une augmentation significative de cette température par rapport à la mesure faite en zone de recette (comprise entre -45°C et -25°C).

Les mesures faites en dessous de la ½ épaisseur indiquent cependant que cette température diminue rapidement une fois la ½ épaisseur passée. La tranche 7 de la calotte supérieure UK située à une trentaine de mm de la ½ épaisseur présente une T<sub>NDT</sub> de -15°C. Pour les calottes UA, pour lesquelles la ségrégation descend plus bas que pour la calotte supérieure UK, cette diminution devient significative à partir du ¾ épaisseur.

Ainsi l'objectif poursuivi au travers de la demande n°9 de la lettre de suite du GP ESPN du 30 septembre 2015 (ref [3] – « l'ASN vous demande d'apprécier la cohérence de la T<sub>NDT</sub> locale avec la valeur retenue à la conception ») portant sur la T<sub>NDT</sub> n'est pas atteint : les températures mesurées sont entre -5°C et 5°C dans les zones les plus ségrégées alors que la valeur retenue à la conception est de -20°C pour RT<sub>NDT</sub>. Par contre, sous la mi épaisseur, cette demande est vérifiée.

Sur la base d'une analyse des phénomènes de dissipation de l'énergie dans une éprouvette Pellini lors d'un essai, il est montré en réf [7] que l'augmentation de la T<sub>NDT</sub> apparaît liée au durcissement du matériau avec la teneur en carbone : Pour le matériau de la zone ségrégée, il est donc logique qu'il faille remonter la température pour retrouver une limite d'élasticité permettant d'absorber suffisamment d'énergie dans le ligament et observer l'arrêt de la fissuration en bord et ainsi définir la T<sub>NDT</sub>. Considérer l'augmentation de la T<sub>NDT</sub> locale comme une mesure de la dégradation des capacités d'arrêt de la fissure apparaît dès lors inapproprié puisqu'une bonne partie du décalage de la T<sub>NDT</sub> est lié au durcissement.

Cette conclusion conduit AREVA à ne pas recommander d'ajout de conservatisme sur les analyses mécaniques de quatrième catégorie en réponse à la recommandation de la lettre de suite du GP ESPN du 24 juin (ref [5]) demandant de se positionner sur ce point en fonction des résultats de Tndt locale.

### 3.2.3.6. Expertises fractographiques

Un nombre important de faciès de rupture a été analysé dans le domaine de la transition, que ce soit sur éprouvettes CT ou de flexion par choc. Tous les points bas des distributions de UK sup et UA inf à  $\frac{1}{4}$  et  $\frac{1}{2}$  épaisseur ont été investigués, ainsi qu'un certain nombre d'éprouvettes correspondant au reste des populations obtenues, à titre de référence. ■■■■■

Ces observations ont été réalisés par les laboratoires d'essais, le centre technique AREVA de Saint Marcel et le CRMC, permettant de croiser les analyses et ainsi fiabiliser les conclusions.

Pour les zones les plus ségréguées ( $\frac{1}{4}$  épaisseur et  $\frac{1}{2}$  épaisseur de la calotte supérieure UA), quelques facettes de rupture intergranulaires isolées sont observées sur le faciès de rupture, le mode de ruine dominant étant une rupture par clivage. Potentiellement, quelques points bas pourraient être associés à un amorçage sur ces zones. Cependant, cette topologie n'est pas systématiquement observée au niveau du site d'amorçage. Les analyses chimiques montrent la présence de carbures sur ces facettes intergranulaires.

Dans les autres zones, les observations menées à date n'ont pas révélé de telles facettes au niveau des sites d'amorçage. La rupture est typique d'une rupture par clivage.

### 3.2.4. Caractéristiques dans le domaine ductile

Les essais de ténacité dans le domaine ductile montrent que l'impact de la macroségrégation sur  $J_{0.2}$  conduit à une diminution de la ténacité par comparaison avec les zones de recette, mais que les requis du RCC-M restent valides à 50°C et 330°C.

Ceci est également illustré Figure 10.

L'ensemble des points obtenus à 50°C dans les zones ségréguées des calottes inférieure UA et supérieure UK s'avère finalement très proches (la valeur moyenne de  $J_{0.2}$  étant d'environ 500 kJ/m<sup>2</sup> avec très peu de dispersion) et les propriétés restent élevées en comparaison aux valeurs codifiées dans le RCC-M, à la fois pour l'amorçage et la propagation.

Les résultats obtenus pour la calotte supérieure UA sont logiquement ceux qui présentent l'impact le plus significatif, en particulier à mi-épaisseur du fait d'une ségrégation élevée et d'un effet de trempe plus défavorable. Il faut noter que des ruptures fragiles pour cette zone ont été constatées à 50°C, ce qui reste cependant cohérent avec la caractérisation du domaine de la transition.

Il faut noter cependant que la zone à mi-épaisseur ne présente pas d'enjeu vis-à-vis du risque de la rupture brutale, un défaut interne situé à cette position étant peu sollicité quelle que soit la situation analysée. Les caractéristiques de ténacité ductile identifiées au  $\frac{1}{4}$  épaisseur des calottes, retenue également pour couvrir les défauts débouchants en peau, s'avèrent excellentes et ne présentent pas de rupture fragile : l'hypothèse de calcul considérant que la ténacité dans le domaine ductile n'est pas affectée est donc vérifiée.

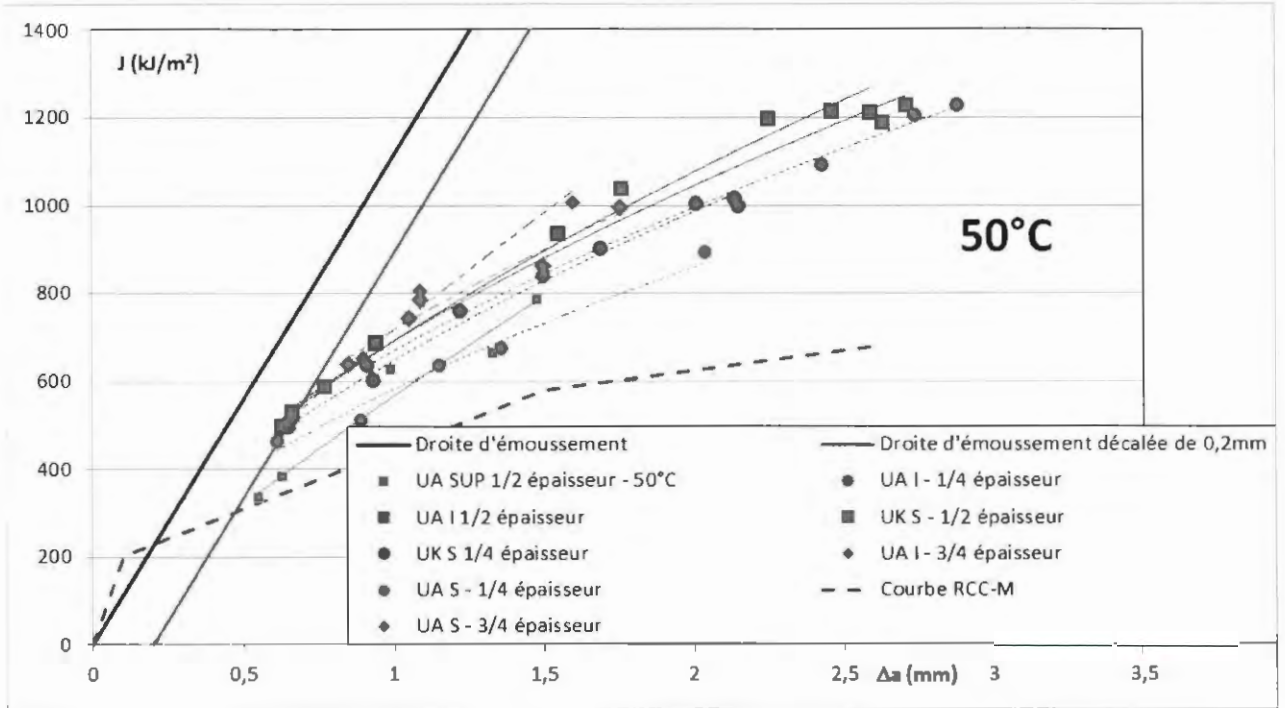


Figure 10 : Ensemble des points finaux obtenus lors des essais de déchirure en zones ségréguées à 50°C.

### 3.2.5. Conclusion

La campagne d'essai mécanique dans les zones ségréguées de trois calottes sacrificielles et dans les zones de recette des calottes de cuve de Flamanville 3 et des calottes sacrificielles a permis d'établir les conclusions suivantes.

- Les caractéristiques de ténacité en zone de recette sont cohérentes, d'un niveau élevé et présentent des marges importantes par rapport aux  $RT_{NDT}$  de recette déterminées avec les essais Pellini,
- Le matériau dans la zone de transition se comporte en zone ségréguée comme un matériau faiblement allié de type 16MND5 et conformément à l'attendu pour une zone ségréguée :
  - o Les courbes de transition en résilience évoluent entre les zones de recette et les zones ségréguées comme prévu par la littérature,
  - o Les distributions de ténacité en fonction de la température à rupture sont similaires dans les zones de recette et les zones ségréguées ; le matériau en zone ségréguée ne présente pas de comportement à rupture atypique et l'impact de la ségrégation se traduit uniquement par un décalage en température,
  - o Les expertises fractographiques sur éprouvettes mettent en évidence des faciès caractéristiques de rupture par clivage.
- Le caractère prépondérant de la concentration en carbone et de l'effet de la vitesse de trempe n'est pas remis en cause :
  - o En zone ségréguée, l'évolution des caractéristiques de ténacité ou de résilience entre le  $\frac{1}{4}$  épaisseur (vitesse de trempe plus grande, haut carbone), la mi épaisseur (vitesse de trempe plus faible en particulier pour les calottes supérieures, carbone intermédiaire) et le  $\frac{3}{4}$  épaisseur (vitesse de trempe plus grande, carbone réduit), met bien en évidence l'effet combiné des deux paramètres,
  - o Il est possible de caractériser un comportement linéaire du décalage de  $T_0$  ou de T68J ou de TCV en fonction du carbone pour différentes trempes. Ces interpolations s'appliquent de manière identique à toutes les calottes sacrificielles.
- La comparaison des résultats de essais de ténacité (614 essais) avec la courbe du code indexé avec la  $RT_{NDT}$  de recette, montre que la grande majorité des points (601 essais – 98%) sont couverts,
- les propriétés dans le domaine ductile a  $\frac{1}{4}$  épaisseur sont supérieures aux valeurs requises par le RCCM à  $\frac{1}{4}$  et à  $\frac{1}{2}$  épaisseur,
- Pour la calotte UA sup, la mi épaisseur présentant une vitesse de trempe légèrement plus faible et des carbones élevés, quelques cas de rupture fragile constatés à 50°C, ce qui reste cependant cohérent avec la caractérisation du domaine de la transition. Ceci est sans conséquence car la mi-épaisseur ne présente pas d'enjeu vis-à-vis du risque de la rupture brutale,
- Les allongements à rupture constatées à température ambiante sont supérieures ou égales à 20% pour toutes les zones investiguées (tête,  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  et  $\frac{3}{4}$  épaisseur).
- Pour les essais de ténacité, les demandes de la lettre de suite du GP ESPN du 30 septembre ref [3] visant à positionner les résultats sont respectés (demande 3 et demandes 9 à 12),
- Les  $T_{NDT}$  locales sont supérieures à la  $RT_{NDT}$  de conception (-20°C à  $\frac{1}{4}$  épaisseur zone de recette) au  $\frac{1}{4}$  et  $\frac{1}{2}$  épaisseur. Cette évolution de la  $T_{NDT}$  locale est principalement liée au durcissement avéré du matériau avec la teneur en carbone impactant la résistance du ligament de l'éprouvette.

### 3.3. Représentativité des calottes sacrificielles pour les calottes de la cuve de Flamanville

Les paragraphes ci-dessous suivent l'ordre logique de la démarche de justification de la représentativité des calottes sacrificielles vis-à-vis des calottes de Flamanville 3 et en rappellent les principales conclusions. On s'appuie sur la note en référence [8] qui détaillent les conclusions ci-dessous.

#### 3.3.1. Définition des paramètres influents

Pour orienter la démarche, la première action consiste à définir les paramètres prépondérants qui peuvent impacter la résistance à la rupture fragile. Cela a permis de définir :

- deux paramètres prépondérants :
  - La teneur en carbone,
  - Les effets de trempe, caractérisés par la vitesse de refroidissement dans la gamme 800°C-600°C, lors de l'immersion dans l'eau de la bache de trempe après austénitisation.
- Des paramètres de second ordre (ex/ taille de grain, ségrégation au phosphore aux joints de grain, ...).

Ces conclusions n'ont pas été remises en cause par l'analyse des résultats des essais mécaniques réalisés sur les pièces sacrificielles comme cela est repris dans la conclusion du § 3.2. En particulier il n'a pas été mis en évidence d'effet d'autres paramètres que le carbone et les vitesses de trempe.

Dès lors que les paramètres prépondérants ont été définis, il peut être recherché l'ensemble des paramètres du processus de fabrication ayant une influence sur leurs amplitudes.

#### Paramètres influençant la ségrégation carbone :

- Ceux relatifs à la coulée et à la solidification du lingot,
- Ceux relatifs au forgeage et à l'emboutissage,
- Ceux relatifs à l'usinage et au positionnement des pièces dans les lingots.

La comparaison des divers paramètres de coulée et de solidification (ex/ Poids de lingot, masselotage, vitesse de coulée, ...) influençant la solidification de toutes les calottes sacrificielles et des calottes de Flamanville 3 n'a pas mis en évidence d'écart qui pourrait impacter l'intensité et la répartition des macroségrégations dans les lingots coulés.

La comparaison des conditions de forgeage et d'emboutissage a, pour sa part, conduit à analyser l'impact de la phase de bondardage qui a conduit sur la calotte FA3 sup à une épaisseur dans l'axe du flan brut de forge plus basse, correspondant à un coup de bondard plus important. Des simulations avec le logiciel FORGE3 ont permis de montrer que l'impact de ce coup de bondard était faible sur la profondeur de ségrégation, le seul effet notable étant sur l'étalement radial de la ségrégation, ce qui est sans impact sur le dossier.

Les taux de chute correspondant aux usinages pratiqués à partir de l'ébauche de forge et permettant d'obtenir les profils finals des pièces apparaissent comme des paramètres influents, vis-à-vis des ségrégations résiduelles dans les calottes. Ces usinages sont en lien avec l'épaisseur d'ébauche et ils conditionnent le niveau de ségrégation, à toutes les positions dans l'épaisseur.

Paramètres influençant les vitesses de refroidissement :

- Ceux relatifs à l'usinage final réalisé après TTQ et par conséquent relatif à l'épaisseur du forgé, avant trempe,
- Ceux relatifs aux conditions de trempe.

Pour analyser l'impact de l'épaisseur des pièces, des simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel FORGE3 en prenant en compte pour chaque calotte :

- D'abord l'épaisseur de la pièce au stade TTQ à la trempe dans la zone d'intérêt au centre de la calotte,
- Ensuite, le balancement des usinages réalisés après TTQ entre les faces internes et externes de la pièce pour obtenir son profil final.

Ces simulations, pour des conditions de trempe équivalentes, mettent en évidence une évolution très continue de la vitesse de refroidissement en fonction de la distance à la surface de trempe.

Par ailleurs, malgré des épaisseurs de trempe légèrement différentes entre les calottes, les vitesses de trempe n'apparaissent pas significativement différentes, à même distance de la surface de trempe.

Il peut être constaté que, quelles que soient les pièces, les vitesses de refroidissement à cœur, c'est-à-dire entre le  $\frac{1}{4}$  épaisseur externe et le  $\frac{1}{4}$  épaisseur interne des pièces évoluent peu.

Selon ces constatations, la calotte FA3 Inf apparait dans une situation plus favorable que les autres calottes, pour ce qui concerne le  $\frac{1}{4}$  épaisseur, peau externe.

L'analyse des conditions de trempe, en particulier, le temps de transfert entre le four et la bache de trempe et les conditions d'agitation lors de la trempe ont permis de conclure à un impact négligeable de ces paramètres. Ces constats étant consolidés par la cohérence des propriétés mécaniques de recette de l'ensemble des calottes ainsi que la cohérence des propriétés mécaniques résultant du programme d'essai.

A ce stade, il est conclu que :

- les gammes de fabrication des calottes sont similaires vis-à-vis des impacts possibles sur l'intensité de la ségrégation à l'exception des taux de chutage et usinages,
- les gammes de fabrication des calottes conduisent à des vitesses de trempe très similaires

### 3.3.2. Positionnement des pièces

Compte tenu des conclusions précédentes, le positionnement relatif des pièces doit être examiné en détail. Pour ce faire, il est choisi de reconstituer l'historique des chutages et usinages dans un bloom.

Compte tenu de l'identité des gammes de fabrication présentée, les différentes calottes sont comparées en les rapportant au bloom, spécifique à ces calottes, conformément au PTF.

De cette analyse, il ressort une vision comparée des positionnements de chacune des pièces dans un bloom de référence identique et ainsi la possibilité de les comparer au regard des concentrations en carbone mesurées sur ou dans les calottes (voir Figure 11)

### 3.3.3. Caractérisation des ségrégations dans les pièces sacrificielles

#### 3.3.3.1. Moyens de mesure

Afin de caractériser le carbone dans les calottes sacrificielles et sur les surfaces des calottes de Flamanville 3, il a été retenu deux techniques :

- Par Spectrométrie par Emission Optique (SEO) :

Cette analyse est basée sur la vaporisation du métal produisant un spectre lumineux dont les longueurs d'ondes sont caractéristiques de l'élément chimique considéré, et dont l'intensité lumineuse est liée à la concentration de l'élément chimique contenu dans l'acier.

- Par Combustion Infra Rouge (CIR) :

Le carbone contenu dans l'acier peut être analysé par Combustion Infra Rouge (CIR). Cette analyse est basée sur la combustion et la mesure des gaz produits par la combustion du matériau par absorption infrarouge.

Compte tenu de l'importance de ces mesures pour le programme de justification, les incertitudes associées ont été définies avec une approche de type R&R (Répétabilité et Reproductibilité) et ont permis de caractériser des incertitudes :

- +/-15% pour les mesures SEO avec les appareils et la procédure d'un prestataire externe,
- +/-10% pour les mesures SEO avec l'appareil et une procédure optimisée par AREVA,
- +/-5% pour les mesures CIR réalisées chez le prestataire en charge des analyses chimiques pour l'ensemble du programme d'essai.

#### 3.3.3.2. Mesures de carbone dans les calottes sacrificielles

Au travers du programme d'essai, des mesures de carbone ont été réalisées via des mesures CIR :

- Dans les calottes sacrificielles à plusieurs niveaux (cf § 3.2.1),
- Sur chacune des éprouvettes du programme,
- En peau interne des calottes.

Le recoupement de ces données et de l'information défini au §3.3.2 sur le positionnement des pièces permet de tracer dans l'épaisseur des calottes une représentation des valeurs de carbone maximales observées.

Ces courbes sont repositionnées dans le bloom de référence du PTF, dont les dimensions sont reprises en abscisse, le carbone est exprimé en valeur absolue et en valeur relative au carbone à la coulée (on parle de taux de ségragation).



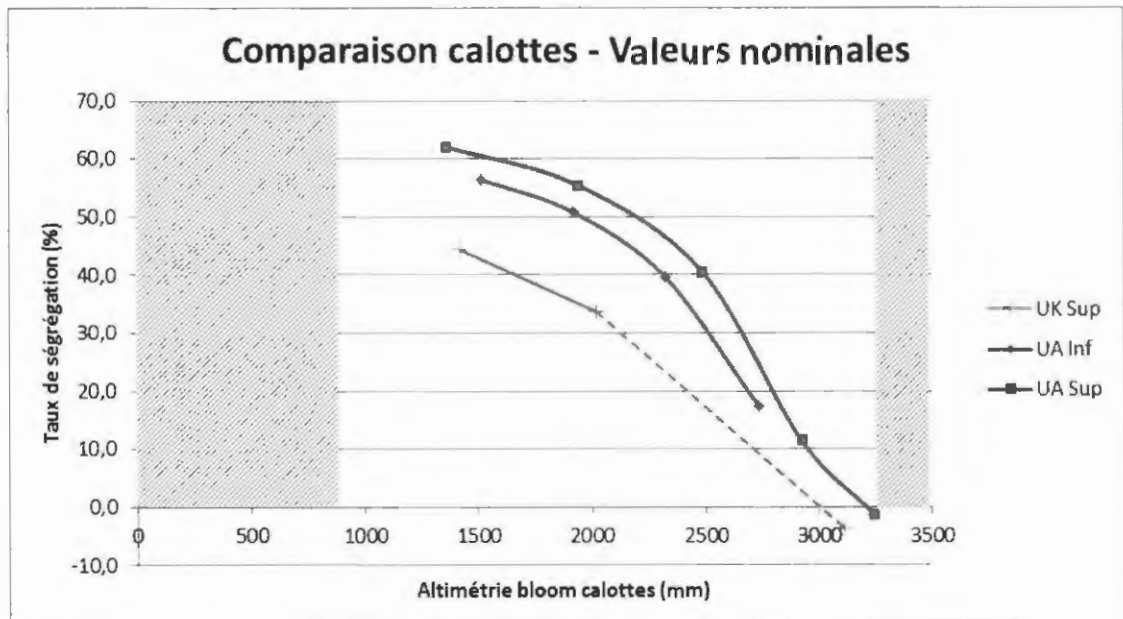


Figure 11 : Evolution de la teneur en carbone maximale – Synthèse des trois calottes sacrificielles – Taux de ségrégation

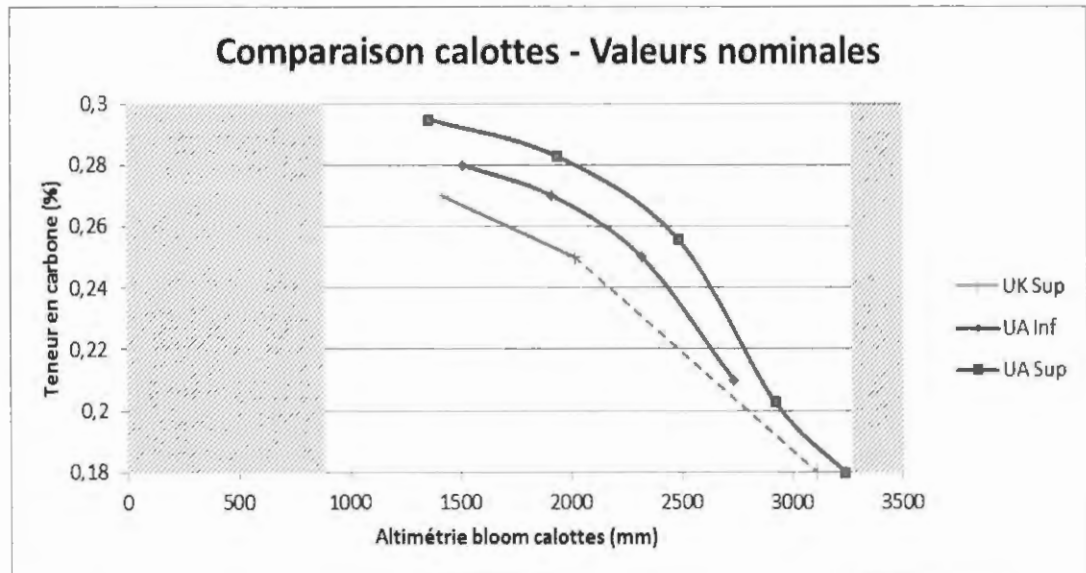


Figure 12 : Evolution de la teneur en carbone maximale – Synthèse des trois calottes sacrificielles – Valeurs absolues

### 3.3.3.3. Cohérence des ségrégations observées

Afin d'affiner l'analyse, les sources de variabilités du carbone ont été analysées. Vis-à-vis des incertitudes de positionnement des pièces dans le bloom et donc des points en 'x' sur les courbes ci-dessus, deux pistes d'incertitudes, relatives aux deux termes les plus importants, ont été investiguées.

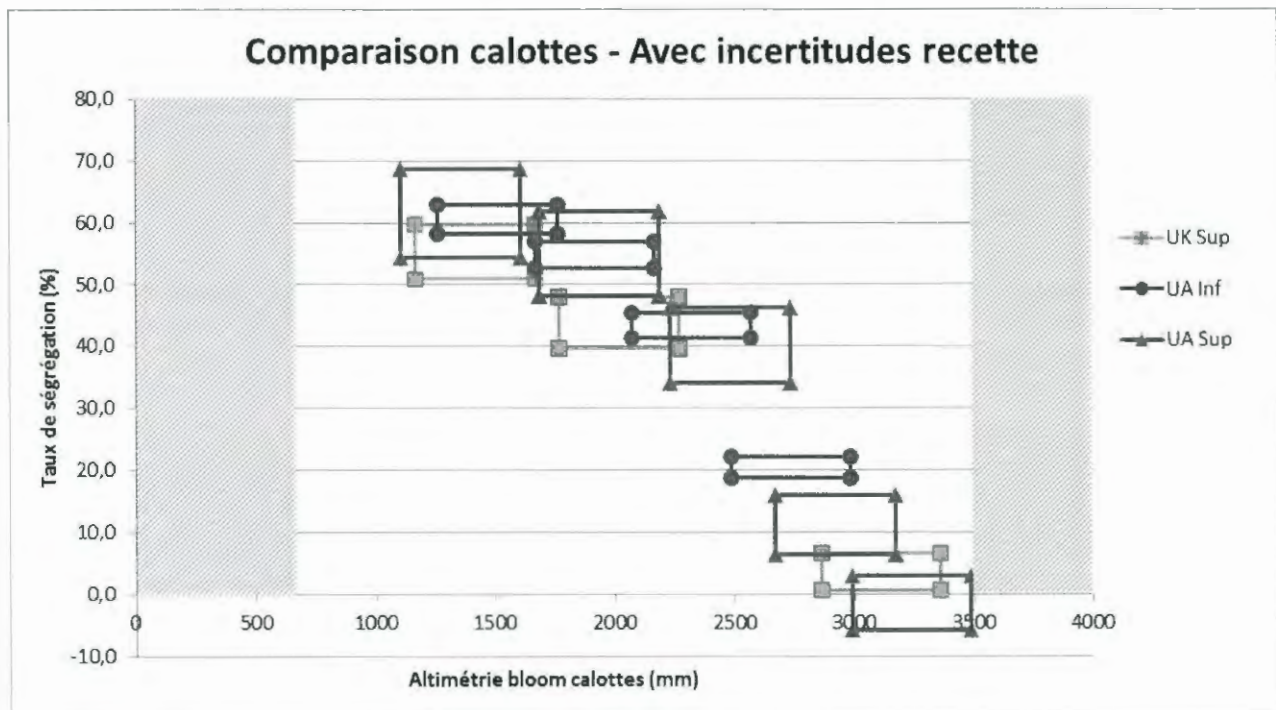
Il s'agit :

- des chutages tête et pied qui sont de l'ordre de plusieurs centaines de mm à l'échelle du bloom,
- des usinages tête et pied qui représentent plusieurs dizaines de mm et qu'il faut recalcr à l'échelle du bloom par un facteur correspondant au taux de corroyage ou ratio de développement de l'ordre de 10.

Ces analyses ont permis de retenir une incertitude sur le positionnement des pièces dans le bloom de +/- 250 mm.

Des mesures de carbone par méthode CIR sur les éprouvettes du programme d'essai en zone de recette ont permis de mettre en évidence une variabilité du carbone dans les zones de recette. Cette variabilité, bien que faible et typiquement de l'ordre de grandeur des incertitudes de mesure, impacte le positionnement des points de mesure en 'y' sur le graphique de la Figure 10 ci-dessus exprimé en taux de ségrégation.

En prenant en compte ces sources d'incertitudes, la figure 10 devient :



**Figure 13 : Evolution de la teneur carbone maximale – Synthèse des trois calottes sacrificielles – Prise en compte des incertitudes**

Une méthode alternative de prise en compte des incertitudes en carbone (en 'y') conduit à une figure très similaire.

A cette étape de la justification de la représentativité et pour ce qui concerne l'évolution des ségrégations, il ressort que :

- les trois calottes sacrificielles présentent de fortes similitudes de comportement dans l'évolution du taux de ségrégation de la tête jusqu'au pied de la partie pertinente du bloom de référence,
- par ailleurs, il a été montré que les incertitudes, présentées ci-avant, pouvaient expliquer les différences observées, entre les taux de ségrégations pour les calottes sacrificielles UA Sup et UK Inf.

Compte tenu qu'il a été également démontré des similitudes, entre ces trois calottes sacrificielles, vis-à-vis de l'effet de trempe ci-avant, il peut être légitimement considéré que ces calottes sont équivalentes, vis-à-vis du comportement mécanique et en particulier de la ténacité. Cette équivalence est évaluée à l'aune des corrélations entre taux de carbone et caractéristiques mécanique mises en évidence au § 3.2.3.4.

Dans ces conditions on caractérise la notion de famille de calotte de cuve par :

- l'utilisation d'un lingot de type 2550,
- une teneur en carbone à la coulée proche de 0,18%,
- des caractéristiques chimiques et mécaniques en zones de recette similaires
- des gammes de fabrication analogues conduisant à des taux de ségrégation majeure positive maximum reproductibles de l'ordre de 40% à 65% et des profils de carbone dans l'épaisseur similaires à ceux présentés dans les figures ci-dessus.

A titre d'illustration, pour compléter l'analyse et renforcer la démonstration, les résultats obtenus sur les calottes sacrificielles ont été comparés avec ceux issus de données R&D pour un bloom sacrificielle également. Cet exercice a également permis de conforter l'analyse de la cohérence des ségrégations observées.

### **3.3.4. Représentativité des calottes sacrificielles vis-à-vis des calottes de Flamanville 3**

Les calottes de Flamanville 3 respectent les trois premiers paramètres de la définition d'une famille :

- l'utilisation d'un lingot de type 2550,
- une teneur en carbone à la coulée proche de 0,18%,
- des caractéristiques chimiques et mécaniques en zones de recette similaires.

Au-delà de ces éléments, il a été vérifié les points suivants :

- similitude des teneurs en carbone à la coulée,
- similitude des teneurs en carbone mesurées dans les zone de recette
- similitude des propriétés mécaniques mesurées en zones de recette (cf § 3.2.2)
- similitude des effets de trempe, caractérisés par les vitesses de refroidissement aux différentes profondeurs caractéristiques (cf § 3.3.1)

En ce qui concerne le positionnement relatif des calottes FA3 dans le bloom, il a été montré que :

- Pour ce qui concerne la calotte FA3 sup, les positions typiques du ¼, ½ et ¾ épaisseurs sont couvertes par les positions équivalentes pour UA sup et UK sup
- Pour ce qui concerne la calotte FA3 inf, les positions ¼, ½ et ¾ épaisseur sont couvertes par les positions équivalentes sur les trois calottes sacrificielles UA inf, UA sup, UK sup.

Nota : « couverte » signifie ici que la position géométrique relative dans le bloom de référence est plus basse pour FA3 que pour les calottes sacrificielles, donc plus loin de la partie haute la plus macro ségrégée.

Afin de compléter cette comparaison, les taux de carbone en surface ont été mesurés.

En surface interne les teneurs en carbone mesurées au cours de la fabrication, avec une technique CIR, pour les calottes FA3 Sup et FA3 Inf sont respectivement de 0,17% et 0,16%. Ceci positionne donc les valeurs en pied dans le bas de la courbe des figures 11 et 12 de manière cohérente avec celles mesurées sur les calottes sacrificielles.

En surface externe la caractérisation s'est faite au travers de mesures de type SEO.

Plusieurs campagnes de mesures ont été réalisées sur les calottes, la première avec l'outil et la procédure d'un prestataire externe, la seconde avec l'outil et la procédure Areva, après avoir mené une campagne d'expertise et d'optimisation de la procédure. Ces optimisations ont permis de définir une incertitude de +/-10%.

Les conclusions de l'ensemble de ces mesures sont :

- L'amplitude en surface de la ségrégation est similaire pour les différentes calottes comme le montrait déjà la première campagne de mesure réalisée début 2015

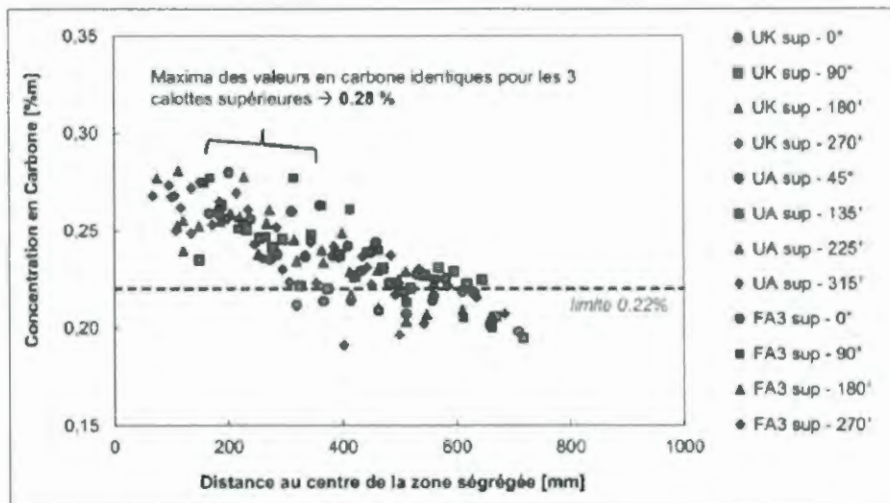


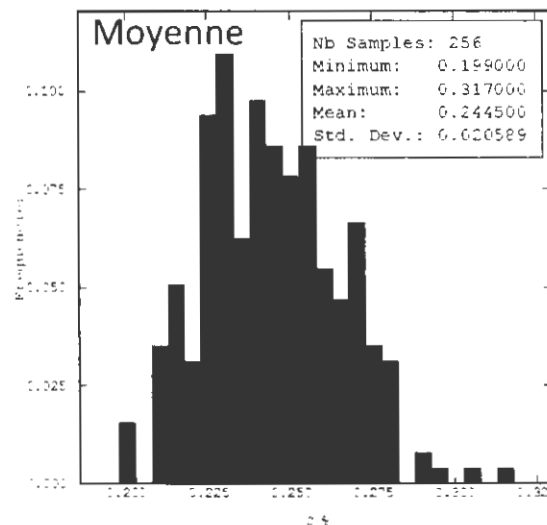
Figure 14 : Mesures réalisées par spectrométrie en surface externe des calottes de cuve (2015)

- toutes les séries de mesure se situe dans une gamme de variation entre les calottes de 0,02% de carbone, comme le montre le Tableau 9 présentant les mesures avec l'appareil et la procédure optimisée AREVA avec une densité de point de mesure augmentée

	UK sup	UA sup	UA inf	FA3 inf	FA3 sup	Ecart entre les valeurs
%C max	0,294	0,296	0,317	0,298	0,314	0,023

**Tableau 9 : Mesures de carbone en surface – outil et procédure affinée**

- Certaines distributions de mesure présentent des points hauts isolés comme le montre la distribution de point de mesure (voir Figure 15) pour la calotte UA inf :



**Figure 15 : Distribution des points de Mesures de Carbone en surface de la calotte UA inf**

Sur les calottes sacrificielles, la prise en compte de ces points hauts ne permet pas de corréler l'intensité de ségrégation avec celle constatée à l'intérieur des calottes. Par contre si on élimine ces points hauts, l'intensité des ségrégations redevient cohérente entre la surface externe et les valeurs mesurées à l'intérieur.

Sans prise en compte de ces points hauts, les mesures pour les 5 calottes se situent également dans une gamme de 0,02% de carbone.

Compte tenu des incertitudes de mesure, une analyse statistique a été menée à titre d'analyse complémentaire. Un traitement géostatistique est pertinent pour caractériser l'incertitude des valeurs de carbone en surface, celles-ci présentant bien une décroissance spatiale à partir du centre de la ségrégation et un ensemble de point de mesure discret. Les analyses réalisées de manière indépendantes par deux sociétés externes conduisent à la même conclusion : les valeurs de carbone maximale mesurée sont dans une gamme de 0,02% de carbone.

De ces analyses, il peut être conclu que :

- Toutes les calottes présentent des taux de carbone en surface très cohérents, dans une gamme de l'ordre de 0,02% de carbone (typiquement une gamme de 10% en taux de ségrégation),
- Les calottes de Flamanville 3 sont englobées en termes de carbone maximum par les calottes sacrificielles, UA inf étant la plus ségrégée selon que l'on considère les points hauts isolées, UA sup si l'on ne prend pas en compte ces points.

Ainsi, sur la base des éléments repris dans ce paragraphe, il peut être conclu que les calottes de Flamanville 3 présentent les mêmes caractéristiques en termes de paramètres influants que les calottes sacrificielles et font partie de la même famille des calottes de cuve. Ainsi, les caractéristiques chimiques et mécaniques, obtenues dans le cadre du programme expérimental sur les calottes sacrificielles, sont représentatives des calottes FA3 pour l'établissement du dossier d'aptitude au service.

### 3.3.5. Conclusion

Dans le cadre du dossier relatif aux calottes de cuve FA3, il a déjà été établi que les deux paramètres majeurs influençant les propriétés de ténacité, pour ce matériau de type faiblement allié, étaient : les teneurs en carbone, ainsi que les vitesses de refroidissement, dans la gamme 800°C-600°C, associés à la trempe réalisée, dans le cadre du traitement thermique de qualité. Ce dernier paramètre est couramment appelé « effet de trempe ».

Sur ces bases, les dossiers de fabrication des diverses calottes, concernées par le dossier (calottes sacrificielles et FA3 supérieure et inférieure) ont été examinés, afin d'identifier dans quelle manière des différences opérationnelles auraient pu conduire à des caractéristiques différentes, entre toutes ces calottes, vis-à-vis des deux paramètres majeurs et ainsi questionner la représentativité des calottes sacrificielles.

Il a été montré que les seules différences de nature à modifier les teneurs en carbone (ségrégations) ainsi que les effets de trempe, étaient liées aux usinages différents pratiqués pour passer d'une ébauche de forge aux géométries de pièces finies.

Pour ce qui concerne les effets de trempe, il a pu être vérifié, à partir de la reconstitution des usinages, de même qu'à partir des propriétés de recette, que ceux-ci étaient in fine totalement reproduits sur toutes les calottes.

Pour ce qui concerne les ségrégations, la comparaison entre calottes a nécessité de positionner l'ensemble des valeurs de carbone, mesurées à différentes profondeurs des calottes sacrificielles, dans un bloom de référence.

Ce travail de comparaison entre calottes a mis en évidence :

- Une reproductibilité de l'évolution des ségrégations dans la hauteur du bloom et par conséquent dans l'épaisseur des calottes,
- Une certaine dispersion entre les différentes pièces sacrificielles.

Ces constats ont conduit à définir une notion de « famille de calottes de cuve », dont les caractéristiques sont :

- l'utilisation d'un lingot de type 2550,
- une teneur en carbone à la coulée proche de 0,18%,
- des caractéristiques chimiques et mécaniques, en zones de recette similaires,
- des gammes de fabrication analogues conduisant à des taux de ségrégation majeure positive maximum reproductibles de l'ordre de 40% à 65% et des profils de carbone dans l'épaisseur similaires à ceux présentés dans les figures ci-dessus.

En complément, à partir de la considération d'éléments bibliographiques et de résultats associés à la dissection d'un bloom sacrificiel (étude de R&D de 2012), il a pu être établi que ces différences de teneurs en carbone, observées entre calottes, pouvaient être attribuées à une variation intrinsèque de ségrégation entre lingots. Cette variabilité est associée aux phénomènes de solidification.

Enfin, à partir de la comparaison de nombreuses données de fabrication et de mesures, pour les calottes de FA3 et pour les pièces sacrificielles, il a été établi que les calottes FA3 pouvaient prétendre à l'appartenance à la famille des calottes de cuve EPR.

Dans ces conditions, il apparaît légitime que les résultats de ténacité, obtenus dans le cadre du programme expérimental sur calottes sacrificielles, puissent être considérés pour l'établissement du dossier d'aptitude au service des calottes de couvercle et de fond de la cuve de FA3.

### 3.4. Comparaison des caractéristiques mécaniques avec les besoins issues des calculs

Le paragraphe 3.1 a permis de montrer que le processus de fabrication n'avait pas généré de défaut nocif perpendiculaire à la surface. Il a permis également de définir une taille enveloppe de défaut, considérée de manière conservatrice comme perpendiculaire à la peau dans les calculs.

Le paragraphe 3.2 a permis de déterminer les caractéristiques mécaniques dans les calottes sacrificielles.

Le paragraphe 3.3 a permis de démontrer la représentativité des caractéristiques mécaniques des calottes sacrificielles vis-à-vis des calottes de la cuve de Flamanville.

Afin de boucler la justification de la tenue en services des zones ségréguées de la cuve, il convient de compléter la démonstration par la comparaison des caractéristiques mécaniques mesurées avec les caractéristiques mécaniques requises par les calculs.

Les calculs de rupture brutale ont été réalisés pour des défauts débouchants en peau externe, enfouis au  $\frac{1}{4}$  épaisseur interne ou débouchant en peau interne et pour toutes les situations ( ) en distinguant toutefois deux cas :

- Les situations de fonctionnement cœur chargé, relatives à la Sûreté de fonctionnement,
- Les situations d'épreuves hydrauliques, relatives à la sécurité, qui se décomposent également en deux cas :
  - l'épreuve hydraulique initiale au taux réglementaire de 1,43 PS (soit 25 MPa) en usine ou sur site avant démarrage, en supposant une température minimale de 35°C;
  - les ré-épreuves hydrauliques décennales au taux de 1,2 PS (soit 21 MPa), en supposant également une température minimale de 60°C.



Une revue approfondie de l'exhaustivité des Situations et charges a été entreprise et a conduit, pour les chocs chauds et pour les chocs froids sur le couvercle, à compléter le Dossier des Situations avec 6 situations listées ci-dessous :

- Situations de choc chaud pour l'étude des défauts en peau externe [REDACTED] :
  - o Situation de 3<sup>ème</sup> catégorie de connexion du RIS-RA en mode RA (RRA connecté) suite à une brèche primaire (uniquement pour la calotte inférieure) ;
  - o Situation de 3<sup>ème</sup> catégorie de reprise de circulation naturelle suite à brèche primaire (configuration enveloppe avec 2 trains d'IS disponibles, concerne uniquement la calotte inférieure) ;
  - o Situation de 4<sup>ème</sup> catégorie de perte de refroidissement par RRA en état C (valables pour les deux calottes inférieure et supérieure) ;
  - o Situation de 4<sup>ème</sup> catégorie de reprise de circulation naturelle suite à brèche primaire (configuration enveloppe sans valorisation des trains d'IS disponible, concerne uniquement la calotte inférieure).
  
- Situation conduisant au refroidissement du dôme pour l'étude des défauts en peau interne (en calotte supérieure) [REDACTED] :
  - o Situation accidentelle d'éjection de grappe (taille de brèche 45 cm<sup>2</sup>, concerne uniquement la calotte supérieure) conduisant à un choc froid.  
A noter que, hors dossier spécifique de justification des zones ségréguées, cette situation n'est pas dimensionnante pour le dossier rupture brutale de la cuve, notamment pour les analyses en zone de cœur et en coins de tubulures.
  - o Situation accidentelle enveloppe des situations de surpression à froid de 4<sup>ème</sup> catégorie, permettant de couvrir le scénario de brèche sur le circuit RRA, RRA connecté. Cette situation ne concerne que la calotte inférieure de la cuve. Dans les délais impartis à l'instruction du dossier thermohydraulique, cette situation est caractérisée, de manière découplée, par un choc froid instantané de 124°C (température maximale de l'état C) à 15°C (température minimale de l'IRWST) associée à une pression maximale primaire de 74,5 bar abs. Du fait du conservatisme de la description thermohydraulique de cette situation, elle n'est pas représentative d'une quelconque réalité physique. Aussi, ce scénario est spécifique à ce dossier de justification de la ténacité nécessaire en zone ségréguée de la calotte inférieure.
  
- La liste des situations étudiées intègre également des situations de surpression primaire à froid (T=15°C homogène), prépondérantes en catégorie 3 pour l'analyse d'un défaut débouchant en peau externe de la calotte supérieure.

Le défaut supposé dans les calculs est un défaut postulé de hauteur 10 mm, enveloppe de la limite de détection par contrôles UT (cf. § 3.1.3), de forme semi-elliptique et d'excentricité 1/3 en parties courantes et quart-circulaire en bord d'alésage, en surface extérieure du couvercle.

Le dossier de conception des calottes de cuve de Flamanville 3 est basé sur l'hypothèse d'une  $RT_{NDT}$  début de vie inférieure ou égale à  $-20^{\circ}\text{C}$ .

L'ensemble du dossier de justification mécanique [REDACTED] est réalisé avec des hypothèses de décalage  $\Delta RT_{NDT}$  découplé des caractéristiques mécaniques réelles des calottes :

- Pour les défauts débouchants en peau externe [REDACTED] et à 1/4 épaisseur [REDACTED], un décalage de découplage  $\Delta RT_{NDT} = 70^{\circ}\text{C}$ , est considéré,
- Pour les défauts débouchants en peau interne [REDACTED], un décalage conservatif  $\Delta RT_{NDT} = 35^{\circ}\text{C}$  est considéré.

Dans la présente note de synthèse, les résultats de l'analyse mécanique, vis-à-vis du risque de rupture fragile, sont présentés des trois manières suivantes :

- Une 1<sup>ère</sup> approche consiste à présenter la marge sous la forme du rapport entre le facteur de marge ( $F_m$ ) et la marge réglementaire ( $F_{mR}$ ), sans tenir compte de la ségrégation.  
Une valeur de  $RT_{NDT \text{ fin de vie}}$  de  $-5^{\circ}\text{C}$ , intégrant les phénomènes de vieillissement par déformation ( $+15^{\circ}\text{C}$ ), est donc ici considérée pour l'ensemble des défauts analysés (en peaux interne et externe des deux calottes).  
Cette analyse de rupture brutale est l'objet du §3.4.2;
- La 2<sup>ème</sup> approche permet de répondre à la demande 12 de la lettre de suite de l'ASN [3]. L'objet de cette analyse est de déterminer le décalage de  $RT_{NDT}$  admissible (conduisant au rapport  $F_m/F_{mR} = 1$ ), de sorte de comparer directement les caractéristiques mécaniques mesurées avec les caractéristiques mécaniques requises par les calculs.  
Cette démonstration est l'objet des §3.4.3, 3.4.4 et 3.4.5 ;
- Une 3<sup>ème</sup> approche consiste à déterminer les marges en ténacité, en superposant sur un graphique ténacité / température la courbe d'évolution du facteur d'intensité des contraintes en fond de défaut au cours des situations prépondérantes du dossier de justification mécanique, et les courbes de ténacité critique  $K_{IC}$  de l'annexe ZG du code RCC-M, indexée sur une température  $T_{env}$  locale, déduite des résultats d'essais mécaniques sur calottes sacrificielles.  
Cette comparaison graphique des résultats de l'analyse mécanique et des caractéristiques matériaux des calottes FA3 est l'objet du §3.4.6 ;
- Le §3.4.7 présente une sensibilité à la taille du défaut en peau externe des calottes en considérant :
  - o Un défaut conventionnel selon l'annexe ZG du code RCC-M de hauteur  $a = 20 \text{ mm}$  ;
  - o Une température d'indexation fin de vie de  $+19^{\circ}\text{C}$  indexée sur les essais de ténacité et transposée aux calottes FA3 (cf. §3.4.6.1).

### 3.4.1. Hypothèses principales des calculs mécaniques

#### 3.4.1.1. Chargements

Les seuls chargements considérés dans la présente étude sont :

- ➔ La pression primaire appliquée en peau interne des modèles,
- ➔ Les sollicitations thermiques.

D'une manière générale, les contraintes thermoélastiques sont calculées en considérant, par approche enveloppe :

- ➔ Un échange thermique fluide / structure parfait,
- ➔ Des caractéristiques thermiques et thermomécaniques constantes, dans le but de majorer les contraintes thermoélastiques.

Le Tableau 10 ci-dessous synthétise les exceptions (en bleu pour les situations de refroidissement du CPP ; en rouge pour les situations de choc chaud) :

Cat.	Situation	Coefficient d'échange thermique		Caractéristiques thermiques et thermomécaniques	
		Calotte inf.	Calotte sup.	Calotte inf.	Calotte sup.
2	20E-3P				
3	3.4	H variable (*)	H infini	Variable (*)	Const.
	3.5.20				
	3.7				
	Connexion du RIS-RA en mode RA suite à brèche primaire	H infini	NC	Variable	NC
	RCN cat. 3				
4	4.3.1	H variable (*)	H infini	Variable (*)	Const.
	4.3.2				
	4.7				
	4.8				
	4.10-1				
	4.10-2				
	Brèche RRA, RRA connecté	H infini	NC	Variable	NC
	Perte totale de refroidissement par le RIS-RRA en mode RA en état C (1ème variante)	H cte ≠ infini		Variable	
Perte totale de refroidissement par le RIS-RRA en mode RA en état C (2ème à 4ème variantes)	H infini		Variable	Const.	
	RCN cat. 4	H infini	NC	Variable	NC

**Tableau 10 – coefficients d'échange pris en compte**

(\*) Uniquement pour l'analyse du défaut débouchant en peau interne. Pour les autres positions de défauts, un coefficient d'échange infini et des caractéristiques matériaux constantes sont considérées, par approche conservative.

Par ailleurs, les situations de choc chaud, générant des contraintes d'ouverture en mode I en peau externe des calottes, sont considérées uniquement pour les défauts débouchants en peau externe.

Les situations de refroidissement du CPP définies dans le DDS sont considérées pour l'ensemble des défauts analysés en dehors des deux situations spécifiques suivantes :

- Ejection de grappe (EDG 45 cm<sup>2</sup>), sollicitant uniquement la calotte supérieure ;
- Brèche RRA, RRA connecté, ne concernant que la calotte inférieure. Pour la calotte supérieure, cette situation est couverte par la situation de surpression primaire de cat. 4 à froid (15°C homogène).

### 3.4.1.2. Analyse rupture brutale vis-à-vis du risque de rupture fragile

L'analyse est conduite par approche simplifiée suivants les règles définies dans l'annexe ZG du code RCC-M, par la méthode de superposition des contraintes, c'est-à-dire à partir des contraintes mécaniques et thermomécaniques déterminées pour un comportement élastique en l'absence de défaut.

Le facteur d'intensité de contrainte élastique est calculé par la méthode des fonctions d'influence définie dans l'annexe 5.4 du code RSE-M. Les coefficients d'influence sont :

- soit issus de l'annexe 5.4 du code RSE-M pour les défauts de forme semi-elliptique en partie courante de calotte en considérant un modèle plaque;
- soit définis spécifiquement pour les besoins de l'étude pour les défauts D11 et D12 situés en coins d'alésage (██████████).

De plus, les hypothèses standards suivantes sont retenues :

- Le facteur d'intensité de contrainte équivalent ( $K_{eq}$ ) est calculé suivant la méthode du cumul  $\theta$  décrite dans l'annexe 5.4 du code RSE-M ;
- La correction de zone plastique  $K_{cp}$  proposé dans l'annexe ZG du code RCC-M est retenue pour l'ensemble des défauts analysés ;
- La courbe  $K_{IC}$  (ténacité critique) de l'annexe ZG du code RCC-M est considérée pour l'analyse de stabilité dans le domaine fragile et de transition ( $T - RT_{NDT} \leq 60^\circ C$ ) ;
- L'analyse de nocivité dans le domaine fragile et de transition est effectué en évaluant à chaque instant de chaque transitoire (pour  $T - RT_{NDT} \leq 60^\circ C$ ) le facteur de marge défini par la relation suivante :

$$F_m = \frac{K_{IC} \text{ (ténacité critique)}}{K_{CP} \text{ (facteur d'intensité de contraintes avec correction de zone plastique)}} \geq F_{mR}$$

Avec  $F_{mR}$  la marge réglementaire issue du §ZG 3230 du code RCC-M, dépendant de la catégorie de la situation analysée, et rappelée ci-après :

	Catégorie 2	Catégorie 3 et épreuves hydrauliques	Catégorie 4
Fragile	2	1,6	1,2

Tableau 11 – Coefficient de sécurité du RCCM en fonction de la catégorie

AL: 0E001 ECCN: N

A noter que dans la suite de la note, les résultats sont présentés :

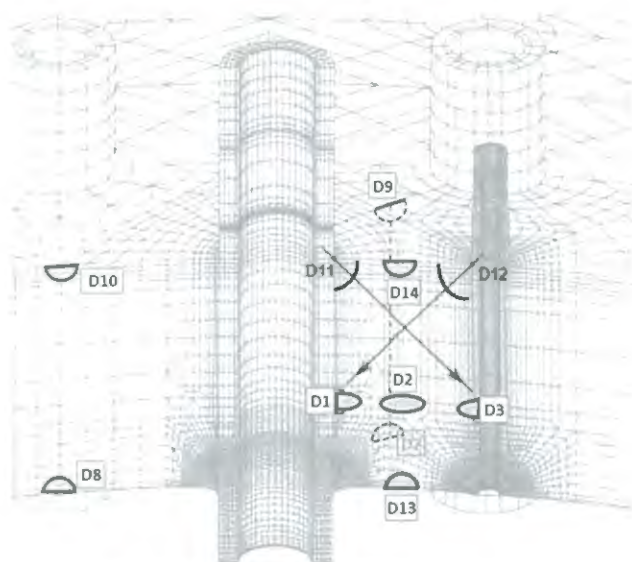
- Soit sous la forme du rapport  $F_m / F_{mR}$ . Le critère est respecté lorsque ce rapport est supérieur ou égal à 1,
- Soit en terme de  $RT_{NDT}$  admissible (intégrant les phénomènes de vieillissement), conduisant à l'égalité  $F_m / F_{mR} = 1$ .

### 3.4.1.3. Défauts pris en compte

Les figures ci-dessous présentent, de façon schématique, les différents défauts étudiés en zone ségréguée pour les calottes supérieures et inférieures :

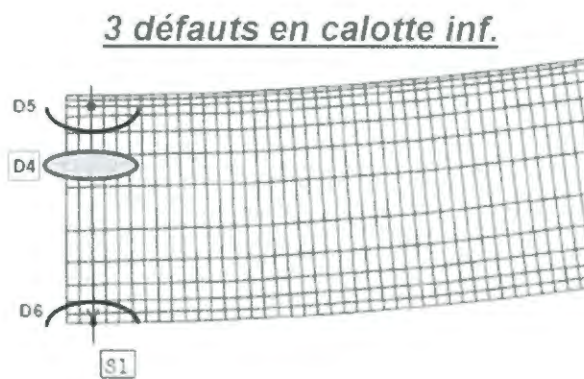
- Défauts débouchants en peau externe dans la zone de ségrégation positive maximale,
- Défauts à  $\frac{3}{4}$  épaisseur en partant de la peau externe en limite de la zone ségrégée,
- Défauts débouchants en peau interne, dans le cadre de la défense en profondeur.

A noter que les défauts localisés au  $\frac{1}{4}$  épaisseur (D4 pour la calotte inférieure et D1 à D3 pour la calotte supérieure) sont systématiquement couverts par les défauts débouchants sur l'ensemble des situations analysés.



13 défauts en calotte sup.

Position des défauts pris en compte sur la calotte supérieure



3 défauts en calotte inf.

Position des défauts pris en compte sur la calotte inférieure

**Figure 16 – Type et localisation des défauts calculés**

### 3.4.2. Résultats de l'analyse rupture brutale sans tenir compte de la ségrégation

L'objet de ce paragraphe est de présenter les résultats de l'analyse rupture au centre des calottes inférieures et supérieures, sans tenir compte du potentiel décalage de  $RT_{NDT}$  engendrée par la ségrégation. Aussi la  $RT_{NDT}$  fin de vie suivante, commune à l'ensemble des défauts étudiés, est considéré :

$$RT_{NDT \text{ fin de vie}} = RT_{NDT \text{ conception}} (-20^{\circ}\text{C}) + \Delta RT_{DNT \text{ (vieillessement)}} (+15^{\circ}\text{C}) = -5^{\circ}\text{C}$$

Nota : le décalage induit par les phénomènes de vieillissement n'est pas pris pour les situations d'épreuve hydrauliques avant 1<sup>ère</sup> exploitation.

Les résultats de l'analyse mécanique sont présentés sous la forme du rapport  $F_m/F_{mR}$ . L'analyse se limite aux défauts débouchants en peaux interne et externe des calottes inférieures, le défaut localisé à  $3/4$  épaisseur étant systématiquement couvert par l'analyse du défaut débouchant en peau interne.

#### 3.4.2.1. Analyse des défauts débouchants en peau externe

Le Tableau 12 ci-dessous présente la synthèse des résultats de l'analyse rupture brutale pour les défauts débouchants en peau externe des calottes inférieure et supérieure, en considérant une  $RT_{NDT}$  de conception ( $RT_{NDT} = -5^{\circ}\text{C}$ ).

##### - Calotte supérieure

Calotte supérieure $RT_{NDT}$ de conception	Cat. 2	Cat. 3	Cat. 4	Epreuve hydrauliques
$F_m / F_{mR}$ (a=10 mm)	4.75	4.71	3.59	3.34
Situation	1A1-90	Suppression primaire de cat. 3 à froid (15°C)	perte RRA cas 1	EH2 (P = 25 MPa; T = 35°C)
Défaut	D9 (partie courante)	D11 (bord d'alésage de MCG central)	D9 (partie courante)	D11 (bord d'alésage de MCG central)

##### - Calotte inférieure

Calotte inférieure $RT_{NDT}$ de conception	Cat. 2	Cat. 3	Cat. 4	Epreuve hydrauliques
$F_m / F_{mR}$ (a=10 mm)	5.80	2.29	2.87	3.51
Situation	20E-3P	Connexion RIS-RA en mode RA	RCN $T_{init}=20^{\circ}\text{C}$	EH2 (P = 25 MPa; T = 35°C)

Tableau 12 – Bilan des calculs en peau externe des calottes pour une  $RT_{NDT}$  de conception ( $RT_{NDT} = -5^{\circ}\text{C}$ )

Or épreuve hydraulique avant 1<sup>ère</sup> exploitation (cœur non chargé), la marge minimale est obtenue pour la situation de connexion RIS-RA en mode RA pour le défaut débouchant en peau externe de la calotte inférieure ( $F_m/F_{mR} = 2,29 > 1$ ).

### 3.4.2.2. Analyse des défauts débouchants en peau interne

Les tableaux ci-dessous présentent la synthèse des résultats de l'analyse rupture brutale pour les défauts débouchants en peau interne des calottes inférieure et supérieure, en considérant une  $RT_{NDT}$  de conception ( $RT_{NDT} = -5^{\circ}C$ ).

#### - Calotte supérieure

Calotte supérieure $RT_{NDT}$ de conception	Cat. 2	Cat. 3	Cat. 4	Epreuve hydrauliques
$F_m / F_{mR}$ (a=10 mm)	3.54	4.31	3.97	4.57
Situation	20A345b	3.4	EDG 45 cm <sup>2</sup>	EH2 (P = 25 MPa; T = 35°C)
Défaut	D13 (partie courante)	D13 (partie courante)	D13 (partie courante)	D7 (partie courante)

#### - Calotte inférieure

Calotte inférieure $RT_{NDT}$ de conception	Cat. 2	Cat. 3	Cat. 4	Epreuve hydrauliques
$F_m / F_{mR}$ (a=10 mm)	4.22	3.26	3.61	3.2
Situation	20E-3P	3.8-2	Brèche RRA	EH2 (P = 25 MPa; T = 35°C)

**Tableau 13 – Bilan des calculs en peau interne des calottes pour une  $RT_{NDT}$  de conception ( $RT_{NDT} = -5^{\circ}C$ )**

Or épreuve hydraulique avant 1<sup>ère</sup> exploitation (cœur non chargé), la marge minimale est obtenue pour la situation de surpression primaire à froid (historique 2A) de catégorie 3 pour le défaut débouchant en peau interne de la calotte inférieure ( $F_m/F_{mR} = 3,26 > 1$ ).

### 3.4.3. Détermination de la température d'indexation maximale admissible issues des études de rupture brutale en peau externe

L'objet de ce paragraphe est de déterminer la valeur de  $RT_{NDT}$  admissible par catégorie, pour un défaut de hauteur a = 10 mm, pour les défauts débouchants en peau externe des calottes inférieure et supérieure, sur la base des résultats de l'analyse mécanique [REDACTED]

Le Tableau 14 ci-dessous résume les situations prépondérantes par catégorie et par calotte, pour les défauts débouchants en peau externe, [REDACTED].

Par la suite l'ensemble de ces situations est considéré pour la détermination de la valeur de  $RT_{NDT}$  admissible.

Défauts débouchants en Peau externe	Cat. 2	Cat. 3	Cat. 4	Epreuves hydrauliques
Calotte supérieure	1A1-90 (D9)	Surpression primaire de cat. 3 à froid (15°C homogène, D11)	Perte RRA cas 1 (D9)	EH 2 avant 1 <sup>ère</sup> exploitation (D11) (T = 350°C ; P = 25 MPa)
Calotte inférieure	20E-3P (D6)	Connexion RRA suite à brèche primaire (D6)	RCN $T_{init}$ 20°C, 25°C, 30°C (D6)	EH 2 avant 1 <sup>ère</sup> exploitation (D6) (T = 350°C ; P = 25 MPa)
	20E-1P (D9)			

**Tableau 14 – Situations prépondérantes pour l'analyse d'un défaut débouchant en peau externe des calottes**

Les tableaux ci-dessous présentent la  $RT_{NDT}$  admissible fin de vie par calotte et par catégorie :

- Une analyse de l'effet du vieillissement a permis de montrer que l'effet du vieillissement sous irradiation était négligeable pour les calottes de cuve et qu'une valeur de +15°C pouvait être définie comme enveloppe de l'effet du vieillissement thermique et de la déformation (cf annexe 4),
- Ce décalage de  $RT_{NDT}$  de +15°C est pris en compte pour l'ensemble des situations, à l'exception de l'épreuve hydraulique site avant 1<sup>ère</sup> exploitation,
- La valeur de  $RT_{NDT}$  admissible fin de vie est plafonnée à 100°C. Si la valeur de  $RT_{NDT}$  admissible dépasse cette valeur seuil, les tableaux ci-dessous présentent le facteur de marge  $F_m/F_{mR}$  pour une  $RT_{NDT}$  de 100°C.

→ **Calotte supérieure**

Calotte supérieure $RT_{NDT}$ de conception	Cat. 2	Cat. 3	Cat. 4	Epreuve hydrauliques
$RT_{NDT}$ admissible (°C) (fin de vie) - a=10 mm	100 °C (Fm/FmR = 1,45)	100 °C (Fm/FmR = 1,84)	74 °C	32 °C
Situation	20A345b	Surpression primaire de cat. 3 à froid (15°C)	Perte RRA cas 1	EH2 (P = 25 MPa; T = 35°C)
Défaut	D11 (bord d'alésage de MCG central)	D11 (bord d'alésage de MCG central)	D9 (partie courante)	D11 (bord d'alésage de MCG central)



→ Calotte inférieure

Calotte inférieure RT <sub>NDT</sub> de conception	Cat. 2	Cat. 3	Cat. 4	Epreuve hydrauliques
RT <sub>NDT</sub> admissible (°C) (fin de vie) - a=10 mm	100 °C (Fm/FmR = 2,05)	60 °C	69 °C	36 °C
Situation	20E-1P	Connexion RIS- RA en mode RA	RCN T <sub>init</sub> =30°C	EH2 (P = 25 MPa; T = 35°C)

**Tableau 15 – RT<sub>NDT</sub> admissible pour les défauts débouchants en peau externe des calottes**

En synthèse, les valeurs de RT<sub>NDT</sub> admissibles en peau externe des calottes sont :

- En situation cœur non chargé (épreuve hydraulique EH2 avant 1<sup>ère</sup> exploitation) :  
RT<sub>NDT</sub> adm = 32°C, en peau externe de la calotte supérieure,
- En situations de fonctionnement normal, exceptionnelles et accidentelles :
  - RT<sub>NDT</sub> adm = 74°C, limitée par la situation de catégorie 4, de perte totale de refroidissement RIS-RA en mode RA en état C3 (sans GMPP),
  - RT<sub>NDT</sub> adm = 60°C, limitée par la situation de catégorie 3, de connexion RIS-RA en mode RA (TRIC < 135°C).

**3.4.4. Détermination de la température d'indexation maximale admissible issues des études de rupture brutale en peau interne**

L'objet de ce paragraphe est de déterminer la valeur de RT<sub>NDT</sub> admissible par catégorie, pour un défaut de hauteur a = 10 mm, pour les défauts débouchants en peau interne des calottes inférieure et supérieure, [REDACTED]

Le tableau ci-dessous résume les situations prépondérantes par catégorie et par calotte, pour les défauts débouchants en peau interne, [REDACTED].

Par la suite l'ensemble de ces situations sont considérés pour la détermination de la valeur de  $RT_{NDT}$  admissible.

Défauts débouchants en Peau interne	Cat. 2	Cat. 3	Cat. 4	Epreuves hydrauliques
Calotte supérieure	20A345b (D13)	3.4 (D13)	EDG 45 cm <sup>2</sup> (D13)	EH 2 avant 1 <sup>ère</sup> exploitation (D7) (T = 35°C ; P = 25 MPa)
Calotte inférieure	20E-3P (D5)	3.8-2 (D5)	Brèche RRA (D5)	EH 2 avant 1 <sup>ère</sup> exploitation (D5) (T = 35°C ; P = 25 MPa)
		3.5-20 (APRP 20 cm <sup>2</sup> , D5)	4.3-2 (APRP LEP, D5)	
		3.7 (D5)		

**Tableau 16 – Situations prépondérantes pour l'analyse d'un défaut débouchant en peau externe des calottes**

De manière analogue au §3.4.3 (pour les défauts débouchants en peau externe), les tableaux ci-dessous présentent la  $RT_{NDT}$  admissible fin de vie par calotte et par catégorie pour les défauts débouchants en peau interne.

→ **Calotte supérieure**

Calotte supérieure $RT_{NDT}$ de conception	Cat. 2	Cat. 3	Cat. 4	Epreuve hydrauliques
$RT_{NDT}$ admissible (°C) (fin de vie) - a=10 mm	100 °C (Fm/FmR = 1,28)	69 °C	49 °C	60 °C
Situation	20A345b	3.4	EDG 45 cm <sup>2</sup>	EH2 (P = 25 MPa; T = 35°C)
Défaut	D13 (partie courante)	D13 (partie courante)	D13 (partie courante)	D7 (partie courante)

→ **Calotte inférieure**

Calotte inférieure $RT_{NDT}$ de conception	Cat. 2	Cat. 3	Cat. 4	Epreuve hydrauliques
$RT_{NDT}$ admissible (°C) (fin de vie) - a=10 mm	100 °C (Fm/FmR = 1,17)	64 °C	57 °C	30 °C
Situation	20E-3P	3.7	APRP LEP	EH2 (P = 25 MPa; T = 35°C)

**Tableau 17 –  $RT_{NDT}$  admissible pour les défauts débouchants en peau interne des calottes**

En synthèse, les valeurs de  $RT_{NDT}$  admissibles en peau interne des calottes sont :

- En situation cœur non chargé (épreuve hydraulique EH2 avant 1<sup>ère</sup> exploitation) :  $RT_{NDT adm} = 30^{\circ}C$ , en peau interne de la calotte inférieure,
- En situations de fonctionnement normal, exceptionnelles et accidentelles :
  - o  $RT_{NDT adm} = 49^{\circ}C$ , limitée par la situation de catégorie 4 d'éjection de grappe (EDG 45 cm<sup>2</sup>),
  - o  $RT_{NDT adm} = 57^{\circ}C$ , limitée par la situation de catégorie 4 d'APRP LEP.

### 3.4.5. Comparaison des caractéristiques mécaniques mesurées avec la température d'indexation maximale admissible

#### 3.4.5.1. Estimation des températures d'indexation pour FA3

Le paragraphe §3.3 a permis de montrer que les caractéristiques mécaniques obtenues sur les calottes sacrificielles étaient représentatives des caractéristiques mécaniques des calottes FA3.

Néanmoins, compte tenu des écarts observés entre les  $RT_{NDT}$  en zone de recette pour les calottes sacrificielles et les calottes FA3, et bien qu'aucune corrélation ne puisse être établie entre les résultats de ténacité en zone ségréguée et les  $RT_{NDT}$  en zone de recette, il est pris en compte un facteur de transposition pénalisant appliqué à chaque température d'indexation.

Le Tableau 18 rappelle les  $RT_{NDT}$  de recette pour les différentes calottes. On peut noter que l'écart maximal observé entre les calottes FA3 et les calottes sacrificielles est de 25°C pour la calotte inf et de 15°C pour la calotte sup.

Tenv	UA sup	UA inf	UK sup	FA3 inf	FA3 sup
$RT_{NDT}$ recette	-35°C	-30°C	-45°C	-20°C	-30°C

**Tableau 18:  $RT_{NDT}$  de recette pour les calottes sacrificielles et de la cuve de FA3**

Sur cette base, il est décidé d'appliquer une correction de +25°C sur les températures d'indexation des caractéristiques mécaniques des calottes sacrificielles afin de les transposer aux calottes de FA3.

Par ailleurs, il est ajouté un décalage des températures d'indexation au titre du vieillissement de +15°C.

### 3.4.5.2. Comparaison des valeurs mesurées avec les valeurs requises par les calculs

#### a) Peau externe

Conformément à la demande 12 de la lettre de suite du GP ESPN du 30 septembre [3], il convient de s'assurer que :

- La température d'indexation permettant d'envelopper les mesures de ténacité en zone ségréguée, notée  $T_{env}$
- La température d'indexation résultant des essais Charpy en zone ségréguée, notée  $TCV - 33^{\circ}C$
- La température d'indexation résultant des essais Pellini en zone ségréguée, notée  $T_{NDT}$

sont bien inférieures à la température d'indexation maximale admissible qui résulte des analyses de mécanique à la rupture brutale, notée  $RT_{NDT}$  admissible.

#### - Calottes supérieures

	$T_{env}$	$TCV - 33^{\circ}C$	$T_{ndt}$	$RT_{NDT}$ admissible calcul
Valeur maximale des 3 calottes sacrificielles	-21°C	-3°C	+5°C	
Valeur transposée à FA3 (avec vieillissement)	+9°C	+27°C	+35°C	+74 °C
Valeur transposée à FA3 (avant exploitation)	-6°C	+12°C	+20°C	+32°C

**Tableau 19 - Comparaison des températures d'indexation mesurées et issues des calculs pour les calottes supérieures en surface extérieure**

- Calottes inférieures

	Tenv	TCV – 33°C	Tndt	RT <sub>NDT</sub> admissible calcul
Valeur maximale des 3 calottes sacrificielles	-21°C	-3°C	+5°C	
Valeur transposée à FA3 (avec vieillissement)	+19°C	+37°C	+45°C	+60 °C
Valeur transposée à FA3 (avant exploitation)	+4°C	+22°C	+30°C	+36°C

**Tableau 20 – Comparaison des températures d'indexation mesurées et issues des calculs pour les calottes inférieures en surface extérieure**

Sur la base des Tableau 19 et Tableau 20, il est montré que la demande 12 de la lettre de suite [3] est bien vérifiée.

b) Peau interne

En peau interne, il a été montré au §3.3 que les valeurs de carbone mesurées sur les calottes sacrificielles et, au cours des opérations de fabrication pour les calottes FA3, retrouvaient des valeurs proche de 0,18%.

Sur les calottes sacrificielles supérieures, les mesures en peau interne vont de 0,17 à 0,18% de carbone. Sur la calotte inférieure, les mesures en peau interne vont de 0,18% à 0,21% de carbone.

Ainsi, il peut être considéré qu'en peau interne les caractéristiques mécaniques ne sont pas, ou très faiblement impacté par le niveau de carbone.

Si de manière découplée et conservative on compare les résultats des essais à ¼ épaisseur et qu'on les compare aux températures d'indexation maximale admissible issue des analyses de mécaniques à la rupture, on montre là aussi que la demande 12 de la lettre de suite [3] est vérifiée comme le montre le Tableau 21, pour lequel les calottes supérieures et inférieures n'ont pas été différenciées.

	Tenv	TCV – 33°C	Tndt	RT <sub>NDT</sub> admissible calcul en peau interne
Valeur maximale da le calotte UA inf et UA sup $\frac{3}{4}$ ep	-62°C	-33°C	-10°C (*)	
Valeur transposée à FA3 (avec vieillissement)	-22°C	+7°C	+30°C	+49°C
Valeur transposée à FA3 (avant exploitation)	-7°C	-8°C	+15°C	+30°C

**Tableau 21 – Comparaison des températures d'indexation mesurées et issues des calculs pour les calottes inférieures et supérieures au  $\frac{3}{4}$  épaisseur**

(\*) La valeur de Tndt = 0°C  $\frac{3}{4}$  épaisseur UA sup, mesuré entre le  $\frac{3}{4}$  et la  $\frac{1}{2}$  épaisseur, n'est pas retenue. Entre le  $\frac{3}{4}$  épaisseur et la peau interne, une Tndt de -20°C a été mesurée. La valeur Tndt = -10°C mesurée au  $\frac{3}{4}$  épaisseur UA inf est donc la valeur enveloppe retenue.

On rappel ici, conformément aux éléments développé au §3.2 et §3.4 que le taux de carbone décroît très rapidement entre le  $\frac{3}{4}$  épaisseur et la peau interne, les valeurs ci-dessus sont donc découplées.

En conclusion il est bien démontré au travers de ce paragraphe que quelle que soit la température d'indexation considérée et en appliquant un décalage pénalisant lors de la transposition des valeurs mesurées sur les calottes sacrificielles, aux calottes de Flamanville3, ces températures d'indexation sont inférieurs à la température maximale admissible issue des analyses de mécanique à la rupture pour le défaut débouchant en peau interne.

Le §5 de ce document, reprend les autres demandes de la lettre de suite et apporte les éléments démontrant leur respect.

### 3.4.6. Appréciation des marges en ténacité en peau externe

Il est proposé deux manières d'appréhender les marges en peau externe des calottes à partir des résultats des caractérisations mécaniques.

#### 3.4.6.1. Prise en compte de la courbe ZG enveloppe des points de ténacité

##### i) Estimation de la température d'indexation pour FA3

Les essais qui permettent de caractériser de manière directe la ténacité du matériau sont les essais de ténacité. Les essais de résilience ou Pellini sont des mesures indirectes conservatives qui ne permettent pas de caractériser précisément la capacité du matériau à résister à l'amorçage en rupture fragile en présence de défaut de type fissure.

Vis à vis de ce risque, il est donc tout à fait légitime d'identifier les marges dans les résultats de calculs en regard des points de mesure de ténacité.

On peut donc estimer sur la base du §3.4.5.2 une température d'indexation enveloppe des points de ténacité des calottes inférieures et supérieures, transposée aux calottes de Flamanville 3 de :

$$T_{env} \text{ FA3} = -21^{\circ}\text{C} + 25^{\circ}\text{C} = +4^{\circ}\text{C}$$

##### ii) Illustration des marges pour une température d'indexation de +4°C

Les tableaux ci-dessous synthétisent les résultats par calotte et par catégorie pour les défauts débouchants en peau externe des calottes, en considérant une température d'indexation de +4°C, soit une température d'indexation fin de vie de +19°C, à l'exception de la situation d'épreuve hydraulique site avant 1<sup>ère</sup> exploitation, ou l'effet du vieillissement n'est pas pris en compte ( $RT_{NDT} = +4^{\circ}\text{C}$ ).

Les situations prépondérantes listées dans le tableau 14 sont considérés dans la présente analyse.

#### → Calotte supérieure

Calotte supérieure Peau externe	Cat. 2	Cat. 3	Cat. 4	Epreuve
Fm / FmR (a=10 mm)	3.07	3.16	<b>2.12</b>	1.74
Situation	1A1-90	Suppression primaire de cat. 3 à froid (15°C)	Perte RRA cas 1	EH (P = 25 MPa ; T = 35°C)
Défaut	D9 (partie courante)	D11 (Coin d'alésage)	D9 (partie courante)	D11 (coin d'alésage)

→ Calotte inférieure

Calotte inférieure Peau externe	Cat. 2	Cat. 3	Cat. 4	Epreuve
F <sub>m</sub> / F <sub>mR</sub> (a=10 mm)	3.90	<b>1.50</b>	1.78	1,68
Situation	20E-3P	Connexion RRA	RCN, T <sub>ini</sub> = 25°C	EH (P = 25 MPa ; T = 35°C)

**Tableau 22 – Bilan de l'analyse des défauts débouchants en peau externe des calottes pour une température d'indexation fin de vie T<sub>env</sub> de +19°C**

Ce tableau met en évidence des marges conséquentes, le facteur de marge minimal étant obtenu en surface externe de la calotte inférieure pour la situation de choc chaud de connexion RIS-RA en mode RA ( ) (F<sub>m</sub>/F<sub>mR</sub> = 1,50 > 1).

De manière à estimer la marge restante en ténacité et en température, les figures suivantes présentent l'évolution des paramètres suivants :

- Evolution fonction de la température du facteur d'intensité de contrainte KCP pondéré par la marge réglementaire (cf. Tableau 11) pour les situations dimensionnantes listées dans le tableau 14,
- Valeur de la ténacité critique fragile K<sub>IC</sub>(T) indexée sur une température d'indexation fin de vie de +19°C pour les situations dimensionnantes.



→ Pour la calotte supérieure :

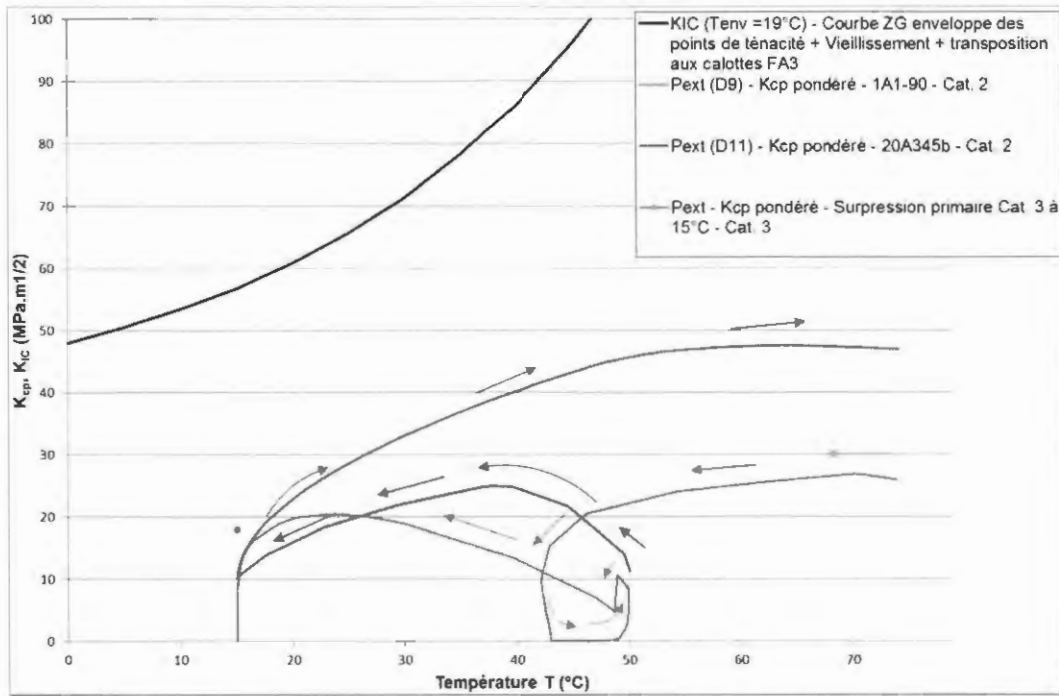


Figure 17 – Evolution de ténacité  $K_{cp}(T)$  pour les situations dimensionnantes en peau externe de la calotte supérieure superposé à l'évolution de la ténacité critique  $K_{IC}(T)$  indexé sur une  $T_{env}$  de +19°C

→ Pour la calotte inférieure :

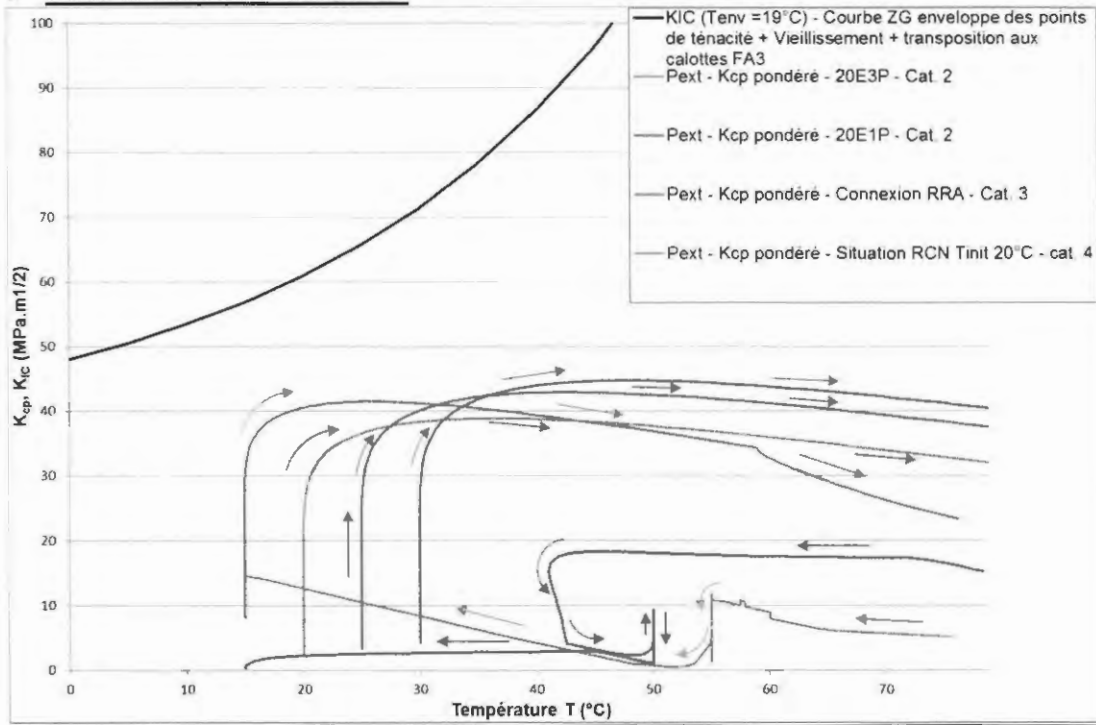


Figure 18 – Evolution de ténacité  $K_{cp}(T)$  pour les situations dimensionnantes en peau externe de la calotte supérieure superposé à l'évolution de la ténacité critique  $K_{IC}(T)$  indexé sur une  $T_{env}$  de +19°C

ECCN: N

AL: 0E001

En synthèse de ces calculs on peut dire que, pour une  $T_{env}$  fin de vie enveloppe de 19°C :

→ **Pour la calotte inférieure** :

La marge en termes de décalage de température d'indexation est de **41°C**. La situation dimensionnante est la situation exceptionnelle de connexion RIS-RA en mode RA,

→ **Pour la calotte supérieure** :

La marge en termes de décalage de température d'indexation est de **55°C**. La situation dimensionnante est la situation accidentelle de perte de refroidissement RIS-RA en mode RA en éta C (sans GMPP),

→ **Globalement**, les résultats sont cohérents entre la calotte inférieure et la calotte supérieure, avec une marge en  $RT_{NDT}$  de l'ordre de 50°C par rapport à la ténacité mesurée.

→ **Vis-à-vis des épreuves hydrauliques**, la marge en terme de décalage de température d'indexation est de :

- **52°C** (limitée par la calotte supérieure) pour les épreuves hydrauliques périodique en cours d'exploitation (épreuve périodique à taux réduit (P = 21 MPa) et à température constante T = 60°C)
- **28°C** (limitée par la calotte supérieure) pour l'épreuve hydraulique avant 1<sup>ère</sup> exploitation (P = 25 Mpa, T = 35°C).

**3.4.6.2. Prise en compte de la courbe ZG définie à partir de la comparaison avec les  $RT_{NDT}$  de recette**

- i) Estimation de la température d'indexation pour les calottes de Flamanville 3

Une autre manière d'estimer la température d'indexation de la courbe ZG couvrant les caractéristiques de ténacité des calottes FA3 est de rassembler l'ensemble des points de ténacité dans un diagramme T- $RT_{NDT}$  de recette pour les trois calottes sacrificielles.

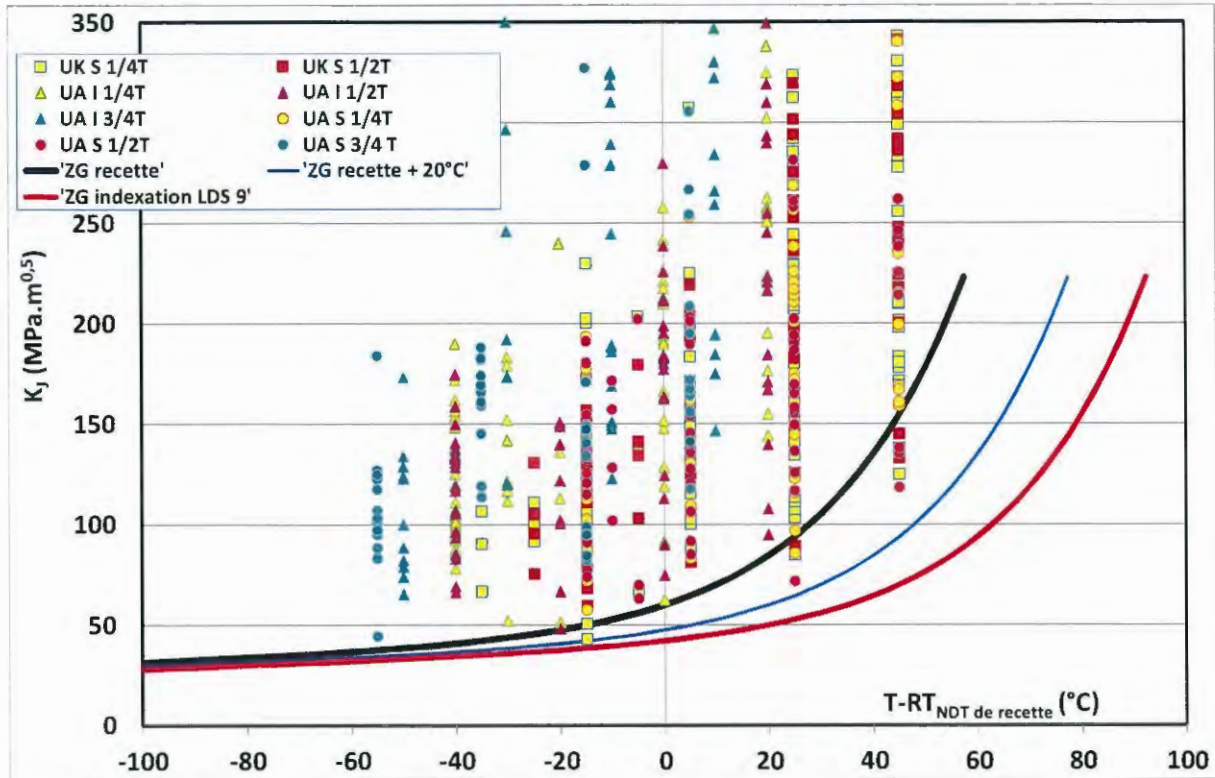


Figure 19 - Ensemble des points de ténacité du programme d'essai en fonction de  $T - RT_{NDT}$  recette (de chaque calotte)

Ce graphique nous montre que la très grande majorité des essais est au-dessus de la courbe de recette pour les calottes sacrificielles, et que seuls quelques points (13 points) sont en dessous. On peut également déterminer qu'en décalant la courbe 'ZG recette' du graphique de +20°C (cf. [7]), l'ensemble des points sont couverts.

Ainsi, et par extrapolation, on peut estimer qu'en décalant la  $RT_{NDT}$  de recette des calottes de Flamanville 3 de +20°C, l'ensemble des points qui auraient été mesurés sur Flamanville 3 aurait été couvert.

On peut ainsi définir pour les calculs, pour Flamanville 3 une température d'indexation de

$$T_{env\ FA3} = -20^{\circ}\text{C} + 20^{\circ}\text{C} = 0^{\circ}\text{C}$$

Il apparaît qu'avec cette approche l'estimation est couverte par celle définie au §3.4.6.1 qui conduit à une température d'indexation  $T_{env\ FA3}$  de +4°C.

### 3.4.7. Sensibilité à la taille du défaut – défaut conventionnel $a = 20$ mm

L'objet de ce paragraphe est de présenter une évaluation de la marge disponible en termes de taille de défaut en considérant un défaut conventionnel  $a = 20$  mm en peau externe des calottes.

Pour cette analyse de sensibilité, la  $T_{env\ FA3}$  fin de vie de 19°C (cf. §3.4.6.1) est considérée. La liste des situations prépondérantes en peau extérieure des calottes (cf. tableau 14) est considérée dans la démarche.

Les tableaux ci-dessous présentent les facteurs de marge minimaux  $F_m/F_{mR}$  par catégorie et par calotte :

→ **Calotte supérieure**

Calotte supérieure Peau externe $T_{env} = +19^\circ\text{C}$	Cat. 2	Cat. 3	Cat. 4	Epreuve hydrauliques
$F_m / F_{mR}$ (a=20 mm)	1.91 (*)	2.41	<b>1.52</b>	1.34
Situation	1A1-90	Surpression primaire de cat. 3 à froid ( $15^\circ\text{C}$ )	perte RRA cas 1	EH2 (P = 25 MPa; T = $35^\circ\text{C}$ )
Défaut	D9 (partie courante)	D11 (bord d'alésage de MCG central)	D9 (partie courante)	D11 (bord d'alésage de MCG central)

→ **Calotte inférieure**

Calotte inférieure Peau externe $T_{env} = +19^\circ\text{C}$	Cat. 2	Cat. 3	Cat. 4	Epreuve hydrauliques
$F_m / F_{mR}$ (a=20 mm)	2.38 (*)	<b>1.06</b>	1.28	1.18
Situation	20E-3P	Connexion RIS-RA en mode RA	RCN $T_{init}=25^\circ\text{C}$	EH2 (P = 25 MPa; T = $35^\circ\text{C}$ )

(\*) Le facteur de marge présentée correspond à une température d'indexation enveloppe de  $30^\circ\text{C}$ .

**Tableau 23 – Bilan de l'analyse des défauts débouchants en peau externe des calottes pour une température d'indexation fin de vie  $T_{env}$  de  $+19^\circ\text{C}$**

Cette analyse de sensibilité montre que, même en considérant un défaut conventionnel de hauteur  $a = 20$  mm, l'ensemble des critères de l'annexe ZG du code RCC-M est vérifié avec une marge minimale de 6 % obtenue en calotte inférieure pour la situation exceptionnelle de connexion RIS-RA en mode RA.

### 3.4.8. Conservatismes de ces études

#### 3.4.8.1. Absence de défaut

Comme indiqué au §3.1, compte tenu du procédé de fabrication avec un fort taux de corroyage, il ne peut pas y avoir de défaut nocif (i.e. défaut perpendiculaire à la peau). Ce point a été confirmé par les contrôles en fabrication et les contrôles complémentaires réalisés sur les pièces et qui montrent qu'effectivement il n'y a pas de défaut en surface. De plus, compte tenu de l'absence de mode de dégradation pouvant conduire à la création de défaut en service ou à la propagation de défaut non détecté, aucun défaut nocif n'est redouté en cours d'exploitation.

Malgré ces considérations, de manière découplée et pénalisante, un défaut de taille 10 mm perpendiculaire à la peau a été considéré à partir d'une analyse enveloppe de la performance des contrôles de fabrication. Ce point sur la considération des défauts constitue un premier conservatisme majeur de l'analyse mécanique.

#### 3.4.8.2. Influence de l'orientation du défaut et de la taille de défaut

Comme vu dans le § 3.1, compte tenu du procédé de fabrication des calottes inférieures ou supérieures, si défaut il y a il ne peut pas être perpendiculaire aux peaux, ou significativement incliné par rapport à la peau.

L'orientation et la localisation du défaut retenues dans les analyses intègrent donc une marge implicite importante : le défaut est considéré débouchant en surface (ce qui favorise son ouverture) et perpendiculaire à la peau et aux plus grandes contraintes principales. Ce choix d'orientation constitue un deuxième conservatisme majeur de l'analyse mécanique. A titre d'exemple (██████████), si on considère une inclinaison de 20° de ce même défaut par rapport à la peau, un coefficient réducteur de 0.34 est à appliquer au facteur d'intensité des contraintes. Traduit en termes de taille de défaut, cela représente un rapport de l'ordre de 8 par rapport au défaut perpendiculaire à la peau.

Vis-à-vis de la taille du défaut en peau externe, la performance des contrôles de fabrication dans l'épaisseur des calottes a conduit à définir une taille de 10 mm. Si par contre on considère des défauts en peau externe, il peut être montré que les performances de contrôle de fabrication sont meilleures pour les 20 derniers mm. Sur cette base, une taille de défaut de 5 mm peut être considérée comme enveloppe. Pour cette taille de défaut et pour l'indexation fin de vie de découplage adoptée au début des analyses mécaniques ( $T^{\circ}$  indexation = 65°C), les facteurs de marge minimaux pour les catégories 2, 3 et 4 sont modifiés comme suit (██████████) :

- Pour la calotte inférieure, le facteur de marge minimal passe de 0,97 à 1,37 (situation de catégorie 3 de connexion RIS-RA en mode RA),
- Pour la calotte supérieure, le facteur de marge minimal passe de 1,09 à 1,53 (situation de catégorie 4 de perte de refroidissement RIS-RA en mode RA).

En peau interne, Il est montré (██████████) que la performance du contrôle DSR mis en œuvre en fabrication permet de détecter une fissure de dimension supérieure à 2x20 mm avec le seuil de notation à 50% de la référence prise en compte dans la procédure de contrôle à une profondeur minimale de 5 mm par rapport à l'interface métal de base/revêtement. Si on considère cette taille de défaut, les facteurs de marge minimaux pour les catégories 2, 3 et 4 sont modifiés comme suit (pour la température d'indexation de découplage adoptée au début des analyses, soit 30°C) :

- Pour la calotte inférieure, le facteur de marge minimal passe de 1,58 à 2,55 (situation de catégorie 4 de brèche RRA),
- Pour la calotte supérieure, le facteur de marge minimal passe de 1,49 à 2,55 (situation de catégorie 4 EDG-45 cm<sup>2</sup>).

L'ensemble de ces applications numérique nous montre que la définition d'une taille de défaut enveloppe de profondeur 10 mm, en peau interne ou externe des calottes inférieure et supérieure, constitue un troisième conservatisme important de l'analyse mécanique.

### 3.4.8.3. Chargements thermo-hydrauliques

La définition des chargements thermo-hydrauliques constitue elle aussi une source de conservatisme important au travers des hypothèses adoptées pour leur définition.

Si on se focalise sur les chargements de chocs chauds conduisant aux facteurs de marge minimaux pour un défaut supposé en peau externe des calottes inférieure et supérieure, les éléments de conservatismes suivants peuvent être apportés :

Pour la situation de reprise de circulation naturelle en APRP (situation prépondérante en catégorie 3), le découplage retenu entre le refroidissement de la cuve avant RCN (qui considère la brèche maximale de catégorie 3, soit 20 cm<sup>2</sup>, localisée en BC) et le choc chaud pendant la RCN (qui considère toute brèche localisée en BF pour maximiser le choc chaud) constitue un conservatisme important, car il cumule dans le même transitoire les conséquences de 2 brèches localisées à des endroits différents avec majoration de leur pénalité respective, et superposition de ces pénalités au-delà de la réalité physique.

Sur cette même situation de chargement, un profil de RCN comportant un plateau au débit maximal de CN diphasique pendant toute la durée de balayage du volume fluide a été retenu, alors que ce profil a la forme d'un pic dont la valeur maximale ne peut être maintenue compte tenu du transfert d'eau froide dans les parties ascendantes du CPP.

Pour la situation de connexion RIS-RA en mode RA (autre situation prépondérante en catégorie 3), l'ensemble des conservatismes suivants sont intégrés dans l'analyse :

- A l'instant de connexion du train RIS-RA en mode RA, les températures fluide et métal en fond de cuve sont prises à la température minimale de l'IS (15°C),
- La coexistence d'une température de 180°C en branche chaude avec une température de 135°C dans le plenum supérieur ignore tout échange de liquide entre ces deux volumes par différence de densité,
- Le train RIS-RA connecté en mode RA est supposé injecter de façon continue à la température de l'eau aspirée en branche chaude, alors qu'une partie de l'eau aspirée en branche chaude est refroidie par l'échangeur RIS-RA/RRI avant d'être réinjectée en branche froide pour assurer le refroidissement du circuit primaire,
- Le mélange avec le volume d'eau contenu dans l'espace annulaire et en fond de cuve n'est pas valorisé,
- Le choc thermique chaud est considéré comme instantané,
- Un coefficient d'échange infini est considéré entre le fluide et la paroi, sans lien avec les débits boucles.

Pour la situation de perte totale de refroidissement RIS-RA en mode RA en état C (sans GMPP – situation catégorisée en catégorie 4 et prépondérante pour la calotte supérieure), l'ensemble des conservatismes suivants sont intégrés dans l'analyse :

- La pression primaire est maximisée et correspond à la pression d'ouverture de la 1ère soupape de sûreté du PZR (tarée à froid et majorée de son incertitude), sans valorisation des soupapes du RIS-RA,
- Pour les cas initiés en état C3, la température initiale est prise égale à la température minimale de l'état C3, soit 15°C, et ce indépendamment de la puissance résiduelle à évacuer. Cette dernière étant par ailleurs prise maximale afin de maximiser le gradient d'échauffement, la température à la sortie de l'échangeur RIS-RA/RR1 sera nécessairement supérieure à 15°C,
- La puissance résiduelle est maximisée à 2s (avec une puissance initiale de 102% de PN) et correspond à l'entrée de l'état considéré,
- Les volumes d'eau secondaire des GV disponibles ne sont pas considérés, incluant les cas où les GMPP sont en service,
- La température initiale de la calotte supérieure est prise égale à 15°C sur toute l'épaisseur pour le transitoire initié en état C3 et sans GMPP en service, alors que la dernière pompe primaire est arrêtée à 55°C,
- Les gradients des transitoires thermiques initiaux retenus pour les analyses mécaniques sont enveloppes des descriptions thermohydrauliques où le gradient thermique est moins sévère (gradient divisé par un facteur 1,9).

#### **3.4.9. Impact sur les autres dommages mécaniques**

D'un point de vue comportement mécanique, la macro-ségrégation en carbone a pour effet principal de durcir le matériau, avec pour conséquence directe une augmentation de la limite élastique du matériau (en comparaison à un même matériau non macro-ségrégé). De ce fait, la résistance du matériau aux dommages mécaniques (déformation excessive, déformation progressive et fatigue) n'est pas affectée par la zone ségrégée (voire même accrue comme c'est le cas pour le risque pression).

#### 4. CONTROLE EN SERVICE

---

Le document en référence [16] décrit la faisabilité technique d'un contrôle en service sur le fond de la cuve et sur la calotte du couvercle. Il est démontré que les zones pertinentes du fond de cuve peuvent être contrôlées en service et que, moyennant des développements important, un contrôle partiel de la calotte du couvercle pourrait être mis en œuvre couvrant 55% à 85% des zones pertinentes.

Par contre, il a été montré dans ce document que :

- ✓ les seuls défauts envisageables, en sortie de fabrication sont des défauts parallèles aux peaux non nocifs vis-à-vis du risque de rupture brutale ;
- ✓ la connaissance du matériau, des sollicitations et des effets de vieillissement ne permettent pas d'envisager la création de défaut en service ;
- ✓ les niveaux de chargement dans la zone ségréguées ne permettent pas d'envisager de propagation d'un éventuel défaut non détecté en fabrication, à supposer qu'il puisse en exister perpendiculaire aux peaux.

Les caractéristiques mécaniques mesurées sur les calottes sacrificielles ont permis de définir des caractéristiques mécaniques du matériau dans les zones ségréguées. En particulier en termes de ténacité, ces caractéristiques permettent de respecter l'objectif de conception de la cuve de Flamanville 3 d'une  $RT_{NDT}$  fin de vie inférieure à 30°C.

L'analyse thermomécanique montre que seul un défaut en peau externe des calottes, perpendiculaire aux peaux, aurait pu présenter une nocivité vis-à-vis du risque de rupture brutale. Or, en prenant en compte les ténacités mesurées dans les pièces sacrificielles, il a été mis en évidence des marges conséquentes, respectivement de 1,5 et 2 fois les marges réglementaires de l'annexe ZG pour un défaut de 10 mm en peau externe des calottes inférieure et supérieure.

L'ensemble des contrôles complémentaires de fin de fabrication réalisés dans le cadre du dossier (ressuages, DSR, magnétoscopie, caméra photo thermique) ont confirmé l'absence de défaut en peau externe pour les calottes (ressuages, magnétoscopie, caméra photo thermique).

Dans une démarche de conception qui prendrait en compte la possibilité d'une ségrégation majeure positive et son impact sur la ténacité locale, la vérification des paramètres ci-dessus conduirait à ne pas déclarer la zone macro ségréguée comme une zone sensible à la rupture brutale et ainsi à ne pas recommander de contrôle complémentaire en service.

Pour le matériau ségrégué des calottes de la cuve de Flamanville 3, la nécessité de contrôles complémentaires ne peut ainsi découler que d'une approche de type défense en profondeur comme le suggère l'ASN en ref [3] :

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.

Pour Areva, ces contrôles complémentaires ont été réalisés au stade de la fabrication, pour la calotte inférieure et pour l'ensemble des calottes sacrificielles, et ne mettent en évidence aucun défaut.



Pour Areva, les éléments apportés :

- sur l'absence de défaut perpendiculaire aux peaux par nature même du procédé de fabrication, le faible niveau de sollicitation qui ne peut conduire ni à amorcer en fatigue des défauts de faible taille ni à en propager significativement,
- l'ensemble des contrôles complémentaires mis en œuvre pour confirmer l'absence de défaut en peau externe pour les calottes (ressuages, magnétoscopie, caméra photo thermique)
- Les marges importantes mises en évidence dans les calculs,

sont des éléments suffisants au titre de la défense en profondeur pour ne pas recommander de contrôle en service.

## 5. BILAN DES REPONSES AUX DEMANDES DE L'ASN

L'autorité de sûreté, à la suite des deux GP ESPN concernant les calottes a :

- validé le 14 décembre 2015 le programme de justification proposé par AREVA en y adjoignant 15 demandes additionnelles (« lettre de suite » de la réunion du Groupe Permanent du 30 septembre 2015 – ref [3])
- validé le 26 septembre les évolutions du programme de justification proposé par AREVA en y adjoignant 2 demandes additionnelles (« lettre de suite » de la réunion du Groupe Permanent du 24 Juin 2016 – ref [5])

Nous reprenons ci-dessous ces demandes et le statut des réponses apportées à ces demandes.

### Demands de la lettre de suite du GP du 30 septembre 2015

**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.

Des contrôles ont été réalisés à l'été 2016 sur le fond de la cuve de Flamanville 3. Les moyens de contrôle (outil et procédure) ainsi que ces performances ont fait l'objet d'une revue de la recevabilité par l'autorité de sûreté la conduisant à ne pas avoir d'objection à la mise en œuvre de ces contrôles. Un contrôle magnétoscopique en mode plafond ne permettant pas de sécuriser une performance suffisante, les contrôles mis en œuvre ont utilisé une technique innovante de type Caméra Photo Thermique (CPA). Ces contrôles n'ont mis en évidence aucun défaut redouté, ils sont présentés en ref [5]

**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.

Le programme a mis en évidence que cette hypothèse n'était pas respectée à mi-épaisseur ce qui a conduit aux adaptations du programme validées par l'ASN suite au GP du 24 juin 2016 (lettre de suite du 26 septembre 2016). Le dossier contient une analyse des transitoires de chocs froid sur la partie intérieure des calottes [REDACTED]

**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.

Concernant les propriétés de ténacité dans le domaine ductile, les essais en zones ségréguées montrent un impact limité de l'augmentation de la teneur en carbone sur la ténacité à l'amorçage. Ces valeurs sont bien supérieures aux valeurs issues du RCC-M, retenues pour les analyses à la rupture brutale.

Il faut noter de plus que les allongements à rupture obtenus sur éprouvettes standards à température ambiante s'avèrent tous supérieurs ou égaux au requis de 20% de l'arrêté ESPN, sur toutes les zones testées des ségrégations (tête, 1/4 épaisseur, 1/2 épaisseur et 3/4 épaisseur).

Voir la référence [7].

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.

L'ensemble de la matière et des éprouvettes sont stockés. Ceci a fait l'objet d'un audit de Bureau Veritas au moins de novembre qui a validé les dispositions mises en œuvre.

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.

Ceci a été fait au travers d'un courrier décrivant le programme d'expertise des éprouvettes sur lequel l'ASN a exprimé qu'elle n'avait pas d'objection à sa mise en œuvre.

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.

Chaque plan de prélèvement (plan décrivant les positions des éprouvettes dans la matière) du programme d'essai a fait l'objet d'un document Areva et d'une réponse de l'ASN validant ce plan de prélèvement. Ceci a permis à l'ASN de s'assurer que les éprouvettes pour les essais mécaniques étaient prélevées dans les zones à plus fort taux de carbone.

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

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.

Les laboratoires retenus sont 17025, cela fait l'objet d'une vérification par Bureau Veritas, qui figurera dans le rapport final qu'ils remettront à l'ASN.

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.

L'ensemble des essais de ténacité respectent la demande 9 concernant le caractère enveloppe de la courbe ZG 6110 du RCC-M indexé sur la  $RT_{NDT}$  de fin de vie diminuée du décalage lié aux différentes sources de vieillissement et de la différence des  $RT_{NDT}$  de recette pour assurer la représentativité des résultats vis-à-vis des calottes FA3.

Par contre, l'objectif portant sur la  $T_{NDT}$  n'est pas atteint : les températures mesurées sont entre  $-5^{\circ}\text{C}$  et  $5^{\circ}\text{C}$  dans les zones les plus ségréguées alors que la valeur retenue à la conception est de  $-20^{\circ}\text{C}$  pour  $RT_{NDT}$ . Cette évolution de la  $T_{NDT}$  locale est principalement liée au durcissement avéré du matériau avec la teneur en carbone impactant la résistance du ligament de l'éprouvette.

Par contre, sous la mi-épaisseur, cette demande est vérifiée. (Cf § 3.2.3.5)

**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.

Les températures identifiées dans cette demande 10 ont été déterminées. Il s'avère que les essais Pellini fixent la  $RT_{NDT}$ .

**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.

La température d'indexation permettant de couvrir les mesures de ténacité est bien inférieure aux deux autres températures d'indexation mentionnées à la demande n°10.

**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.

Pour l'ensemble des zones testées la demande 12 est vérifiée comme cela est mis en évidence au §3.4.5 de ce document.

**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.

Ceci fait l'objet du document en référence [16].

**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.

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.

AREVA a transmis ces analyses à l'autorité de sûreté au travers de deux notes dédiées.

### Demandes de la lettre de suite du GP du 24 Juin 2016

Demande n° 1: Je vous demande d'étudier, en complément au défaut hypothétique aux trois quarts de l'épaisseur, un défaut hypothétique sous le revêtement.

Cette demande a été prise en compte, [REDACTED]

Demande n° 2: Je vous demande de mettre en œuvre des contrôles par essais non destructifs de recherche de défauts sous le revêtement en peau interne de la calotte inférieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville 3.

Ce contrôle a été réalisé sur le fond de la cuve de Flamanville 3 et s'est terminé le 15 décembre 2016, il n'a pas mis en évidence de défaut notable. Ces résultats seront versés dans une révision de la référence [5].

### Bilan des engagements pris par AREVA en amont du GP ESPN du 30 sept 2015

Dans le cadre de l'instruction du dossier de justification de la ténacité des calottes de la cuve de Flamanville 3, des engagements ont été pris par AREVA [REDACTED]. Ces éléments ont été pris en compte par l'ASN en amont du GP ESPN du 30 septembre 2015.

L'objet de ce paragraphe est de rappeler ces engagements et de fournir les références des éléments de réponse.

### Recommandation 2

Le rapporteur recommande qu'AREVA réalise dans le cadre de la fabrication, en complément des contrôles déjà réalisés, des essais non destructifs de surface pour s'assurer de l'absence de défauts.

### Engagements AREVA

AREVA s'engage à :

- Transmettre un PV de ressuage du fond de cuve FA3, obtenu après l'opération de meulage visant à éliminer les points de contacts liés à la spectrométrie portative par étincelage.
- Réaliser un ressuage de longue durée sur le fond de la cuve FA3.
- Réaliser un contrôle par magnétoscopie en zone périphérique du couvercle FA3 qui est exempté d'adaptateurs.
- Transmettre des PV de contrôle par magnétoscopie des calottes UA sup et UA inf
- Répéter un contrôle par magnétoscopie et un contrôle par ressuage long sur la calotte UA sup, laquelle a subi une épreuve (avec le corps de cuve FA3) depuis le précédent contrôle magnétoscopique.

Le document en référence [6], reprend les Procès-Verbaux des contrôles listés ci-dessus.

### Recommandation 3

Le rapporteur recommande que les études de mécanique à la rupture permettant de déterminer la ténacité suffisante soient également effectuées selon l'analyse « conventionnelle ».

### Engagements AREVA

- Pour le dossier de justification de la ténacité suffisante AREVA prendra en compte le défaut de 10 mm et s'engage à compléter la documentation par des évaluations, au titre d'étude de sensibilités, avec un défaut de 20 mm.
- AREVA s'engage, pour le cas des épreuves site, à prendre dans un premier temps en compte le défaut de 20 mm pour définir la température d'épreuve et dans le cas où l'analyse avec défaut conventionnel conduirait à une température d'épreuve industriellement contraignante ou impossible, en cohérence avec le RCCM, à :
  - Considérer les propriétés mécaniques de début de vie pour l'épreuve initiale (pas de vieillissement) et fin de vie pour les épreuves de requalification
  - Fixer une température d'épreuve raisonnablement industrielle.
  - Déterminer le défaut vérifiant strictement les critères du code RCC-M.
  - Comparer celui-ci au défaut en limite de détection.

Le §3.4.7 présente la sensibilité au calcul avec un défaut conventionnel de 20 mm.

Dans ce paragraphe, pour la situation d'Épreuve Hydraulique, le critère est respecté sans modification la température d'E.H. prévu de 35°C, le second engagement ne s'applique donc pas.

## Recommandation 4

---

Compte tenu du peu de données sur le vieillissement thermique et sous déformation durant 60 années de fonctionnement de pièces fortement ségréguées, le rapporteur recommande qu'un programme d'essais soit mis en œuvre pour confirmer le faible vieillissement thermique et sous déformation des zones fortement ségréguées de l'acier 16MND5 des calottes de la cuve de Flamanville 3.

### Engagements AREVA et EDF

- AREVA et EDF s'engagent à fournir un dossier plus complet justifiant de la non pertinence d'un programme de vieillissement, en fin de premier trimestre 2016.

Le document [REDACTED] détail les éléments de réponse à cet engagement.

## Recommandation 5

---

Le rapporteur recommande que les investigations qui seront menées sur la calotte inférieure UA permettent de :

- confirmer l'étendue de la zone ségréguée en surface et dans l'épaisseur de la calotte inférieure ;
- caractériser, de manière complémentaire au programme d'essais sur la calotte supérieure UK, les propriétés mécaniques de ténacité en zone ségréguée.

### Engagements AREVA

- AREVA s'engage à réaliser la caractérisation chimique sur la calotte inférieure UA suivant le même programme que celui qui sera réalisé sur la calotte supérieure sacrificielle UK.
- De manière complémentaire à cette chimie, AREVA s'engage à réaliser un programme complet d'essais mécaniques identique à celui qui sera réalisé sur la calotte supérieure sacrificielle UK.

Le programme mis en œuvre a bien intégré la caractérisation de la ségrégation et des propriétés mécaniques dans les calottes UA inf et UK sup, ces éléments sont documentés en référence [7].

## Recommandation 6

---

Le rapporteur recommande que le même traitement thermique soit appliqué à l'ensemble des éprouvettes utilisées pour le programme d'essais et que ce traitement soit équivalent à celui réellement subi par les calottes de la cuve de Flamanville 3.

- Afin que toutes les caractéristiques et en particulier la  $RT_{NDT}$ , soient obtenues avec la même valeur de référence, pour ce qui concerne les traitements thermiques de détentionnement, AREVA s'engage à réaliser l'ensemble des essais du programme de qualification sur des éprouvettes qui auront subi le traitement de détentionnement requis dans les spécifications d'approvisionnement, à savoir :
- : vitesse de montée en température jusqu'à 400°C : libre
  - : vitesse de montée en température à partir de 400°C : 55°C/h maxi
  - : maintien à 620°C ± 5°C pendant 16h à 16h30
  - : vitesse de refroidissement jusqu'à 400°C : 55°C/h maxi
  - : vitesse de refroidissement en dessous de 400°C : libre

Par ailleurs, AREVA considère qu'il est préférable de réaliser le traitement thermique simulé sur un bloc de 800 mm x 400 mm, plutôt que sur un bloc de 400 mm x 400 mm.

Un traitement thermique de détentionnement a été réalisé sur les blocs de 800 x 400 mm prélevés dans les calottes sacrificielles. Le cycle ci-dessus a bien été suivi, cela a fait l'objet d'un suivi très précis de la part de Bureau Veritas.

Chaque opération a fait l'objet d'un procès-verbal versé au RFF du programme, les opérations ont été suivies par l'organisme mandaté Bureau Veritas.

## Recommandation 7

---

Le rapporteur recommande qu'AREVA propose des modalités de justification de la ductilité suffisante du matériau dans l'hypothèse d'un allongement à la rupture en écart par rapport à la valeur du point 4 de l'annexe 1 de l'arrêté en référence

### Engagements AREVA

- AREVA réalisera donc des essais de ténacité dans le domaine ductile et la vérification de la suffisance de la ténacité obtenue. Ceci permet de pallier pour les calottes de cuve à une valeur de ductilité qui serait inférieure aux 20% d'allongement requis par l'arrêté ESPN.
- AREVA précise que les règles de conception et de fabrication usuellement mises en œuvre pour les appareils sous pression nécessitent un matériau présentant une ductilité suffisante : AREVA s'engage à respecter comme valeur minimale pour l'allongement à rupture la valeur de 14% requise par le Décret DESP pour la zone macrosegregée des calottes FA3.

Des essais de ténacité dans le domaine ductile ont été réalisés sur les trois calottes sacrificielles à chacun des niveaux analysés (UK sup, UA inf, UA sup ¼ et ½ épaisseur et le ¾ épaisseur de UA inf et UA sup). Par ailleurs des essais de traction ont permis de montrer le respect du requis de 20% d'allongement dans chacun des niveaux analysés ainsi qu'en peau externe des calottes. Ces éléments sont détaillés en ref [7].



## Recommandation 8

---

Le rapporteur recommande qu'un protocole d'évaluation des incertitudes soit mis en place pour les analyses chimiques qui seront réalisées par le laboratoire de Creusot Forge. Le rapporteur recommande que les essais Pellini, les prélèvements de copeaux et les analyses chimiques fassent l'objet d'une surveillance spécifique par un organisme agréé permettant de s'assurer du respect des procédures d'essais, de la traçabilité des éprouvettes et de l'évaluation des incertitudes d'analyse chimique.

### Engagements AREVA

- Comme indiqué dans le programme d'essais PFCSGN/NCR0002, AREVA s'engage à traiter les incertitudes de mesure conformément aux exigences de chaque norme d'essai utilisée.

Ces incertitudes de mesure sont quantifiées pour les essais de traction, de ténacité et de résilience.

- Pour les essais Pellini, il n'y a pas de mesure d'incertitude au sens strict. AREVA s'engage à présenter les procédures de mise en œuvre qui permettent de justifier la bonne maîtrise de l'essai.

Pour les mesures de chimie, il est généralement admis que la méthode de combustion des copeaux permet de quantifier la composition d'un échantillon à quelques millièmes de pourcent près.

- AREVA s'engage à rédiger un protocole spécifique d'évaluation de cette incertitude.

- AREVA s'engage à ce que la préparation des éprouvettes et la réalisation des analyses chimiques et des essais PELLINI soient faites sous la surveillance de Bureau Veritas qui agira, sous un mandat qui sera délivré par ASN-DEP. BV surveillera le respect des méthodes de prélèvement et de préparation des éprouvettes, en particulier pour les éprouvettes PELLINI et les méthodes d'essais, qui seront décrites dans les procédures particulières d'AREVA. Il sera également porté attention au respect des paramètres chiffrés de ces procédures et plus particulièrement pour les essais PELLINI.

Le traitement des incertitudes associées aux essais font l'objet d'un livrable de la part des trois laboratoires engagés sur le programme (Areva Erlangen, SCK Mol, Amec). Ceci fait l'objet d'une instruction par l'organisme mandaté Bureau Veritas.

Les essais Pellini ont été suivi par l'organisme mandaté Bureau Veritas. L'ASN a par ailleurs réalisé un audit de la réalisation des essais Pellini le 6 et 7 octobre 2016. [REDACTED]

Les mesures chimiques sur copeaux chez Filab ainsi que les mesures carbonées par spectrométrie portative ont fait l'objet d'une définition des incertitudes et d'une optimisation des procédures de réalisation. [REDACTED]

## Recommandation 9

---

Le rapporteur recommande qu'AREVA analyse l'impact sur les résultats d'essais et leur interprétation de la différence entre les normes applicables au contrat FA3 et celles qui seront utilisées pour le programme d'essais.

### Engagement AREVA

- AREVA s'engage à réaliser une analyse d'impact de l'évolution de ces normes sur les résultats d'essais.

La note [REDACTED] contient cette analyse d'impact, cette note a fait l'objet d'une revue par l'organisme mandaté Bureau Veritas.

## Recommandation 13

---

Le rapporteur recommande qu'AREVA détermine, pour différentes valeurs de  $RT_{NDT}$  d'indexation, les marges par rapport aux critères calculées selon la démarche retenue et les compare à celles que présenteraient, avec la même démarche, les calottes si elles étaient exemptes de ségrégations majeures positives en carbone.

### Engagement AREVA

- AREVA s'engage à fournir, avant le GP du 30 septembre 2015, une étude de sensibilité sur les facteurs de marges couvrant l'impact d'un décalage de la  $RT_{NDT}$ , dans la zone macro ségrégee, par rapport à la  $RT_{NDT}$  spécifiée et celui du défaut conventionnel en comparaison avec le défaut de référence de 10 mm retenu pour le dossier de justification.

Cette étude se fera sur l'ensemble des situations et charges du dossier de conception, relatives au fonctionnement en service, complété par les transitoires de type chocs chauds identifiés pour les catégories 3 et 4 dans le JTS3.

Les décalages de  $RT_{NDT}$  retenus, égaux à  $+35^{\circ}\text{C}$  et  $+70^{\circ}\text{C}$ , correspondent respectivement au décalage probable et au décalage enveloppe, identifiés à partir de l'interprétation des résultats obtenus sur la carotte UA.

Pour chaque catégorie et dimension de défaut, les marges minimales seront précisées, ainsi que le niveau de sollicitation associé ( $K_{cp}$ ) et la température à laquelle est obtenue cette marge minimale. Ces données seront évaluées :

- : dans la zone macro ségrégee, en considérant la  $RT_{NDT}$ , spécifiée à la conception ( $-20^{\circ}\text{C}$ ), ainsi qu'un décalage de cette  $RT_{NDT}$  de  $+35^{\circ}\text{C}$  et  $+70^{\circ}\text{C}$ ,
- : dans le joint R/P, en considérant la  $RT_{NDT}$  spécifiée à la conception ( $-20^{\circ}\text{C}$ ),
- : dans la virole de cœur, en considérant la  $RT_{NDT}$  spécifiée à la conception ( $-20^{\circ}\text{C}$ ), et un défaut interne débouchant.

[REDACTED]

## 6. CONCLUSIONS

---

Dans le cadre de l'évaluation de la conformité à l'arrêté ESPN [1] de la cuve destinée à l'EPR de FA3, AREVA a mis en évidence fin 2014 des résultats de résilience inférieurs à la valeur requise par cet arrêté (60 J à 0°C requis en tout point, en valeurs individuelles).

L'instruction a permis de relier ce résultat à la ségrégation majeure positive résiduelle de carbone provenant du processus d'élaboration des pièces concernées. AREVA a proposé une méthode de justification basée sur un programme expérimental sur des calottes sacrificielles et des analyses mécaniques de tenue à la rupture brutale. Cette méthode et ce programme ont fait l'objet de deux Groupes Permanents (GP), le 30 septembre 2015 et le 24 juin 2016, et de deux lettres de suite de la part de l'ASN le 14 décembre 2015 et le 26 septembre 2016.

Ce rapport synthétise les éléments visant à démontrer la ténacité suffisante des calottes du fond de cuve et du couvercle de Flamanville 3 et ainsi de son aptitude au service.

La notion de ténacité suffisante s'analyse en regard de l'impact de la ségrégation majeure positive, c'est-à-dire d'un taux de carbone localement plus élevée, sur le phénomène de rupture brutale. Ce phénomène apparaît si il y a conjonction :

- i. La présence d'un défaut nocif (ayant une composante perpendiculaire à la surface du composant)
- ii. Une ténacité du matériau insuffisante
- iii. Des chargements mécaniques et/ou thermiques importants

La démonstration de la ténacité suffisante du matériau dans ce document s'appuie sur :

A. La démonstration de la non existence de défaut nocif en s'appuyant sur :

- la description détaillée du procédé de fabrication et de la performance des moyens de contrôle
- la démonstration de la non possibilité d'amorcer ou de propager des défauts pendant les 60 ans d'exploitation compte tenu des conditions de fonctionnement vue par les calottes de cuve
- les contrôles complémentaires de fin de fabrication réalisés

Ceci, au regard du point i) ci-dessus, élimine une des composantes du risque de rupture brutale.

B. La caractérisation détaillée du matériau en zone ségrégée de trois calottes sacrificielles permettant de mettre en évidence :

- des caractéristiques de ténacité en zone de recette d'un niveau élevé et présentant des marges importantes par rapport aux  $RT_{NDT}$  de recette déterminées avec les essais Pellini,
- 98% (601 sur 614) des points de mesure de ténacité, en zone ségrégée, sont couverts par la courbe du code indexé avec la  $RT_{NDT}$  de recette, malgré le décalage lié à la concentration en carbone localement plus élevée
- que le matériau dans la zone de transition se comporte en zone ségrégée comme un matériau faiblement allié de type 16MND5 et conformément à l'attendu pour une zone ségrégée
- la non remise en cause du caractère prépondérant sur la ténacité de l'effet de la concentration en carbone et de la vitesse de trempe et la mise en évidence d'une corrélation linéaire entre « le décalage des propriétés en zone ségrégée par rapport aux propriétés en zone de recette » et « le taux de carbone »
- le respect des valeurs requises par le RCCM dans le domaine ductile
- Des allongements à rupture constatées à température ambiante supérieurs ou égales à 20% pour toutes les zones investiguées (tête,  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  et  $\frac{3}{4}$  épaisseur).
- Des  $T_{NDT}$  locales supérieures à la  $RT_{NDT}$  de conception ( $-20^{\circ}\text{C}$  à  $\frac{1}{4}$  épaisseur zone de recette) au  $\frac{1}{4}$  et  $\frac{1}{2}$  épaisseur. Cette évolution de la  $T_{NDT}$  locale est principalement liée au durcissement avéré du matériau avec la teneur en carbone impactant la résistance du ligament de l'éprouvette.
- Ces résultats caractérisent le matériau des calottes sacrificielles qui se comporte comme un matériau faiblement allié de type 16MND5 pour lequel l'indexation de la courbe du code, englobant les points de ténacité en zone ségrégée, est décalée au plus de  $20^{\circ}\text{C}$  par rapport à la  $RT_{NDT}$  de recette.

C. La démonstration de la transposabilité des résultats du programme d'essais aux calottes de Flamanville 3 en s'appuyant sur :

- La cohérence des paramètres de fabrication : coulée et solidification du lingot, forgeage et emboutissage, positionnement des pièces dans les lingots
- La cohérence des paramètres chimiques et mécaniques en zone de recette
- La cohérence des effets de trempe
- La cohérence des profils de concentration en carbone dans l'épaisseur des pièces sacrificielles
- La cohérence de ces profils avec celui caractérisé dans un bloom dans le cadre d'un programme R&D (MOPPEC)
- La cohérence des mesures de carbone en surface externe et interne

Il est ainsi démontré la représentativité des calottes sacrificielles vis-à-vis des calottes de la cuve de Flamanville 3.

Ceci, au regard du point ii), permet de caractériser la ténacité dans les zones ségrégées des calottes de cuve de Flamanville et de leur appliquer les conclusions ci-dessus sur le comportement mécanique du matériau et ainsi d'apprécier la suffisance de la ténacité du matériau en zone ségrégée.

D. La vérification enfin que ces caractéristiques de ténacité mesurées sont suffisantes en regard des caractéristiques requises pour résister aux chargements mécaniques et/ou thermiques. Cette vérification se fait :

- En se découplant totalement des conclusions du A en postulant l'existence d'un défaut nocif perpendiculaire à la peau, d'une dimension enveloppe des performances de contrôle en fabrication
- En montrant que les températures d'indexation mesurées sur les calottes sacrificielles en zones ségréguées (température d'indexation permettant d'envelopper les mesures de ténacité, résultant des essais Pellini et résultant des essais Charpy) une fois transposées à Flamanville avec une pénalité de +25°C et un effet de vieillissement de +15°C, restent bien inférieures à la température d'indexation maximale admissible qui résulte des analyses de mécanique à la rupture,
- en caractérisant les marges associées aux caractéristiques mécaniques de ténacité mises en évidence au point B. Ces analyses mettent en évidence des marges de typiquement de 50°C en variation de  $RT_{NDT}$  admissible ou de 1,6 et 2 fois les marges réglementaires de l'annexe ZG.

Ceci, au regard des trois composantes du risque de rupture brutale (i), (ii) et (iii)), permet d'apporter de manière dé耦lée une démonstration du respect des marges du code et en recouplant l'ensemble des résultats de la démonstration, de mettre en évidence des marges significatives.

Ces éléments sont de nature à justifier la ténacité suffisante des calottes de la cuve de Flamanville 3 et par conséquent leur aptitude au service.

7. ANNEXE 1 : DEFAUTS INACCEPTABLES DANS LES CALOTTES ET PERFORMANCE DES CONTROLES

[Redacted content]

Cette annexe contient des informations relevant du secret industriel et commercial

AL: 0E001 ECCN: N



[Redacted content]

[Redacted content]

Cette annexe contient des informations relevant du secret industriel et commercial

[Redacted content]

[Redacted content]

AL: 0E001 ECCN: N



[Redacted text block]

[Redacted]	[Redacted]	[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]	[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]	[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]	[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]	[Redacted]	[Redacted]
[Redacted]	[Redacted]	[Redacted]	[Redacted]

Cette annexe contient des informations relevant du secret industriel et commercial

[Redacted text block]

AL: 0E001 ECCN: N

[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]

Cette annexe contient des informations relevant du secret industriel et commercial

AL: 0E001 ECCN: N

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

Cette annexe contient des informations relevant du secret industriel et commercial

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

AL: 0E001 ECCN: N





N° D02-ARV-01-104-503

REV. B PAGE 93 / 108

[Redacted line]

[Redacted block]

AL: 0E001 ECCN: N

AL: 0E001 ECCN: N

[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]

Cette annexe contient des informations relevant du secret industriel et commercial

[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
------------	------------	------------	------------	------------

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

ECCN: N

AL: 0E001

[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]

Cette annexe contient des informations relevant du secret industriel et commercial

AL: 0E001 ECCN: N

[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]

Cette annexe contient des informations relevant du secret industriel et commercial



[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
		[REDACTED]		

Cette annexe contient des informations relevant du secret industriel et commercial

[REDACTED]

[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]

Cette annexe contient des informations relevant du secret industriel et commercial

AL: 0E001 ECCN: N

[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
			[REDACTED]	
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]

Cette annexe contient des informations relevant du secret industriel et commercial

AL: 0E001 ECCN: N

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

Cette annexe contient des informations relevant du secret industriel et commercial

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

AL: 0E001  
ECCN: N

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

Cette annexe contient des informations relevant du secret industriel et commercial

8. ANNEXE 2 : DOSSIER NNB HPC [REDACTED]

[REDACTED]

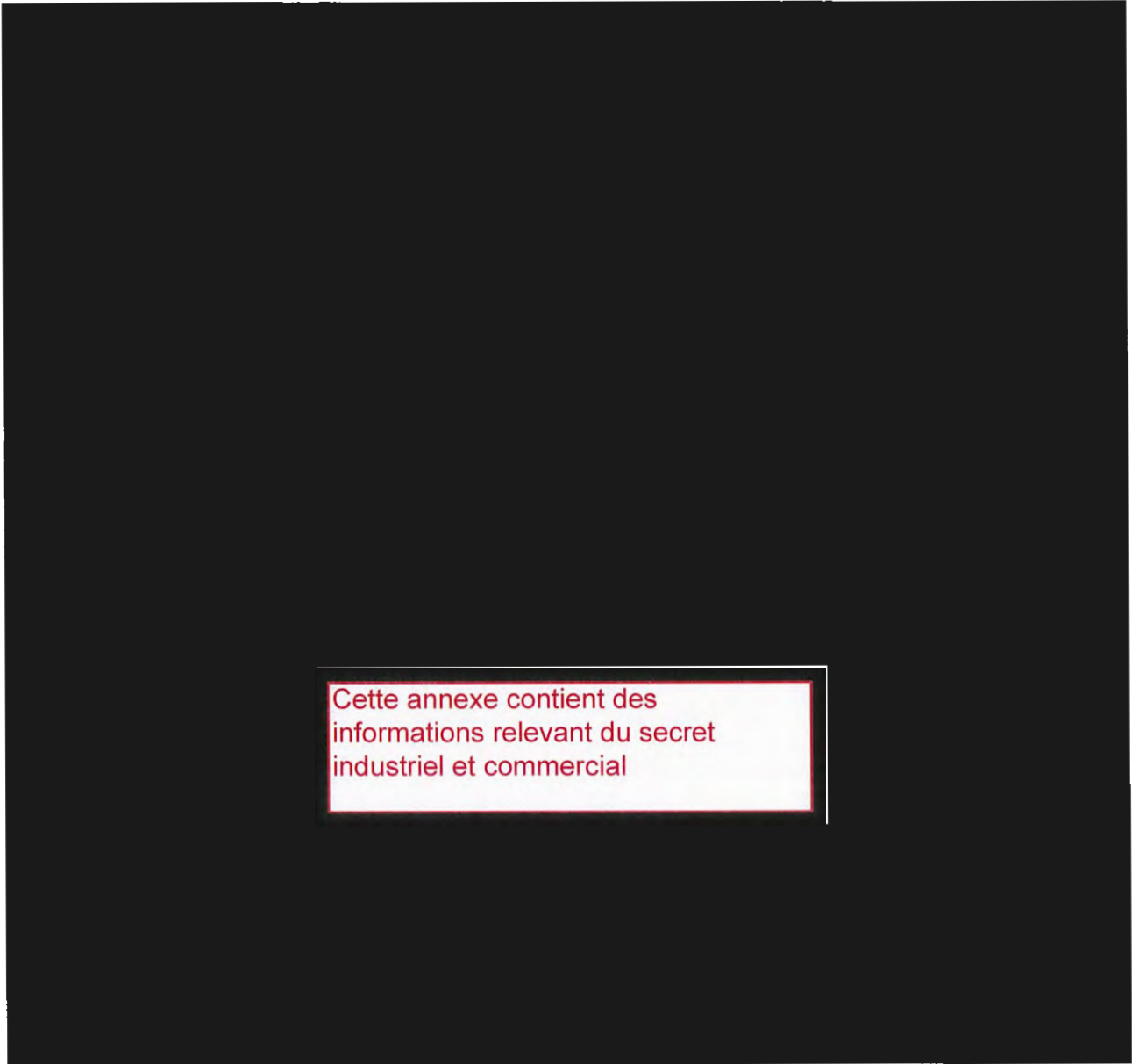
[REDACTED]

[REDACTED] :

[REDACTED]

Cette annexe contient des informations relevant du secret industriel et commercial

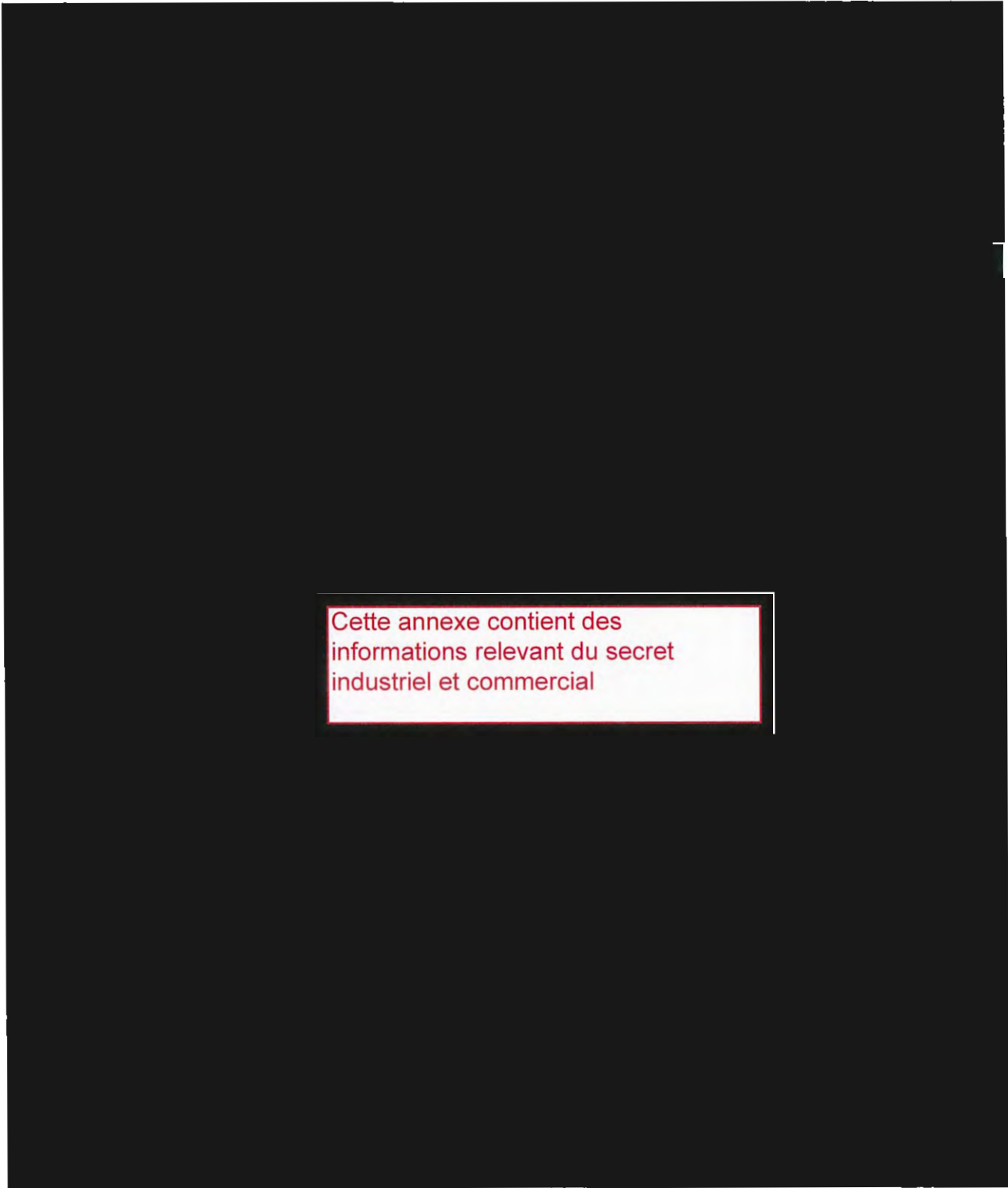
AL: 0E001 ECCN: N



Cette annexe contient des informations relevant du secret industriel et commercial



AL: 0E001 ECCN: N



Cette annexe contient des informations relevant du secret industriel et commercial



## 9. ANNEXE 3 : EVALUATION DU DECALAGE EN TEMPERATURE PAR COMPARAISON DES COURBES DE RESILIENCE APPROCHE INITIALE PENALISANTE

---

Cette analyse a été réalisée en 2015, avant obtention des résultats des essais mécaniques sur pièces sacrificielles afin de définir une hypothèse enveloppe pour les calculs de rupture brutale à réaliser.

A partir des essais Charpy réalisés sur la zone de recette de la calotte supérieure UA, il est possible d'indexer approximativement (car le nombre de points n'est pas optimal pour cette analyse) une courbe de résilience. De même, il est possible à partir des 6 essais de résilience à 0°C dans la zone centrale au quart-épaisseur, coté tête de la calotte, de positionner une courbe de résilience.

La distance entre ces deux courbes permet de déterminer une mesure conservatrice du décalage en température :

- En général, les décalages issus des essais Charpy sont plus importants que les décalages mesurés à partir d'essais de ténacité,
- Le transfert de ce décalage directement sur la  $RT_{NDT}$  de recette néglige la marge implicite de cette température permettant de couvrir une partie de l'impact de la macro-ségrégation.

La Figure 20 ci-dessous présente cette construction conduisant à une estimation du décalage des courbes de résilience de l'ordre de 70 °C.

KV (J)

### UA Calotte supérieure

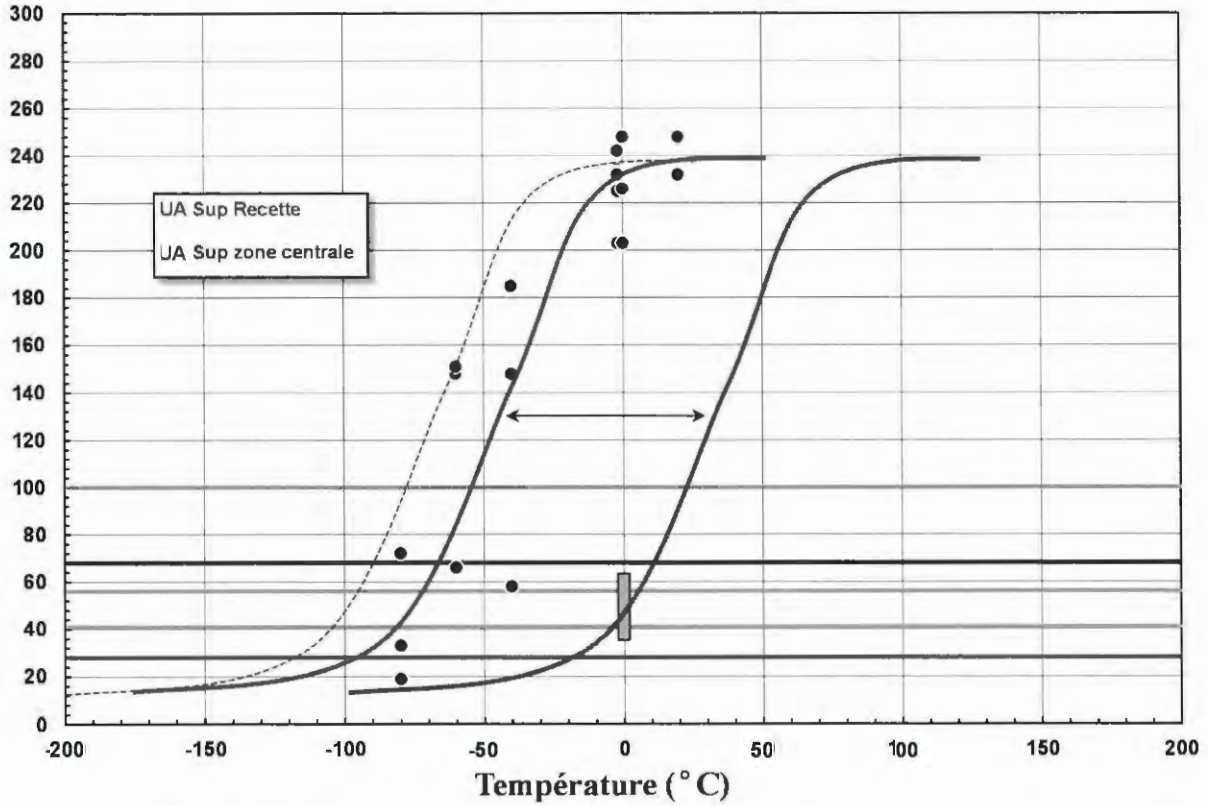


Figure 20: Calotte UA. Evaluation de la transition de résilience entre zone de recette et ¼ épaisseur tête dans l'axe

De ces évaluations préliminaires, il ressort que le décalage de transition de température attendu entre la zone de recette et la zone ¼ épaisseur, côté tête, dans l'axe devrait être très inférieur à 70°C et probablement beaucoup plus proche de 35°C.

## 10. ANNEXE 4 : IMPACT DU VIEILLISSEMENT SUR LA $RT_{NDT}$ DE LA CUVE

---

### 10.1. Introduction

Trois modes de vieillissement doivent être évalués :

- Durcissement progressif dû à l'irradiation par les neutrons d'énergie supérieure ou égale à 1 MeV,
- Fragilisation progressive des anciens joints de grains austénitiques due à la migration des atomes de phosphore sur ces interfaces,
- Vieillissement dynamique induit par la première mise en température de la cuve après épreuve hydraulique (« strain aging »).

### 10.2. Fragilisation par irradiation

Les zones incriminées se trouvent au centre de la partie inférieure et de la partie supérieure de la cuve. Aucun effet de focalisation du flux neutronique par le réflecteur lourd vers ces zones centrales inférieures et supérieures n'a été observé dans les analyses faites sur le flux neutronique. Par ailleurs, la présence de plus d'un mètre d'eau et de la plaque inférieure de cœur conduit à atténuer le flux en partie inférieure de cuve de plusieurs décades par rapport aux viroles de cuve (en ordre de grandeur : le flux rapide passe de  $10^{10}$  n/cm<sup>2</sup>/s à  $10^4$  n/cm<sup>2</sup>/s).

En partie supérieure de cuve, la présence de plus de 5 mètres d'eau et de la plaque supérieure de cœur

conduit à atténuer encore plus fortement le flux (quelques décades supplémentaires).

Ainsi il n'est envisagé aucun effet de vieillissement sous irradiation pour les calottes.

### 10.3. Vieillissement thermique

La fragilisation induite par le vieillissement thermique des aciers bainitiques et martensitiques a donné lieu à des travaux de recherche depuis les années 1950 (travaux de Mac Lean en particulier). La thèse de M. Guttman, soutenue en mars 1974, est un document de référence sur ce sujet. Le mécanisme de fragilisation des anciens joints de grains austénitiques est connu. Il s'agit de la migration d'impuretés, essentiellement le phosphore, sur ces interfaces. La modélisation du phénomène fait intervenir des notions de thermodynamique et de cinétique de diffusion.

Le taux de couverture des joints de grains par le phosphore peut donc se calculer et également se mesurer par spectrométrie Auger. Le passage du taux de couverture des joints de grains au décalage de  $RT_{NDT}$  se fait à l'aide de mesures de résilience réalisées sur des aciers faiblement alliés plus ou moins vieillis à des températures de l'ordre de 350 à 450°C. La mise en oeuvre de températures plus élevées que celle d'utilisation de la cuve permet d'atteindre dans des temps raisonnables l'état de vieillissement après 60 ans d'exploitation (vieillissement accéléré mettant en oeuvre strictement le même mécanisme qu'à la température de service).

Etant donné les très faibles teneurs en phosphore des pièces en acier faiblement allié actuellement fabriquées ( $3.10^{-3}\%$  pour la calotte supérieure et  $4.10^{-3}\%$  pour la calotte inférieure), la fragilisation calculée de la calotte de couvercle à partir du modèle de Mac Lean, après 60 ans de fonctionnement, à 325°C reste faible, même en prenant en compte la macroségrégation du phosphore, évaluée aussi intense que celle du carbone (le taux de macroségrégation du phosphore a été mesurée sur la plaque tubulaire PT165 expertisée dans les années 1980 et trouvé égal à celui du carbone). La fragilisation de la calotte de cuve est quant à elle complètement négligeable étant donné que sa température de fonctionnement est de 300°C.

La Table 6, extraite de l'Annexe ZG du RCC-M, présente la valeur du décalage de  $RT_{NDT}$ , dans ces conditions (teneurs en phosphore prenant en compte la macroségrégation de cet élément, aux températures de 300 et 325°C après 40 et 60 ans de fonctionnement).

	Delta $RT_{NDT}$ vieillissement Métal de Base (°C)			
	300°C		325°C	
P (ppm)	40 ans	60 ans	40 ans	60 ans
40	2	2	4	5
60	3	3	6	7
80	4	4	8	10

**VEILLISSEMENT THERMIQUE SELON CODE RCC-M**

**10.4. Conclusion**

Etant donné que :

- le vieillissement thermique calculé après 60 ans de fonctionnement est au maximum égal à 7°C pour la calotte de couvercle et 3°C pour la calotte de cuve,
- 
- le vieillissement induit par irradiation est complètement négligeable,

**il est attribué à chaque pièce un décalage de  $RT_{NDT}$  dû au vieillissement de 15°C, correspondant**

**au décalage forfaitairement attribué au vieillissement sous déformation (strain aging).**