

Rapport au Groupe permanent d'experts pour les équipements sous pression nucléaires

CODEP-DEP-2015-037971

Rapport IRSN/2015-00010

Version publique

(Les parties grisées correspondent à des secrets industriels)



Séance du 30 septembre 2015



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

Date	Le directeur des équipements sous pression nucléaires de l'ASN	La directrice des systèmes, des nouveaux réacteurs et des démarches de sûreté de l'IRSN
16/09/2015	R. CATTEAU	S. CADET-MERCIER

SOMMAIRE

RÉFÉRENCES	4
SIGLES, ABRÉVIATIONS ET DÉNOMINATIONS.....	6
1. INTRODUCTION.....	8
2. CADRE RÉGLEMENTAIRE ET EXIGENCES APPLICABLES À LA CUVE DE L'EPR DE FLAMANVILLE 3.....	10
2.1. Défense en profondeur et exclusion de rupture	10
2.2. Meilleures techniques disponibles	12
2.3. Exigences essentielles portant sur les propriétés des matériaux et la qualification technique	12
2.3.1. Exigences sur les propriétés des matériaux.....	13
2.3.2. Exigence de qualification technique	13
3. HISTORIQUE DE LA DÉMARCHE DE QUALIFICATION TECHNIQUE ET CAS SPÉCIFIQUE DES CALOTTES DE CUVE DE FLAMANVILLE 3	15
3.1. Présentation des caractéristiques principales de la cuve destinée au réacteur de Flamanville 3.....	15
3.2. Présentation du processus d'élaboration des calottes de la cuve de Flamanville 3 et historique des composants similaires.....	17
3.3. Dossiers déposés par AREVA jusqu'aux essais de 2014	22
3.3.1. Premier dossier de qualification technique des calottes de la cuve de Flamanville 3	22
3.3.2. Analyse des écarts par rapport aux modalités de respect de l'exigence de qualification technique	23
3.3.3. Essais sur la calotte supérieure UA	25
3.4. Position du rapporteur	26
4. DÉMARCHE DE JUSTIFICATION PROPOSÉE PAR AREVA.....	31
4.1. Principes de la démarche de justification.....	31
4.2. Détermination de la ténacité suffisante	33
4.2.1. Définition de la ténacité suffisante.....	33
4.2.1.1. Proposition d'AREVA	33
4.2.1.2. Position du rapporteur	34
4.2.2. Défauts potentiellement présents dans les calottes	34
4.2.2.1. Définition et justification du défaut inacceptable susceptible d'être présent dans les calottes à l'issue de leur fabrication.....	34
4.2.2.2. Essais non destructifs réalisés sur les calottes.....	37
4.2.2.3. Performances de détection	38
4.2.2.4. Résultats des contrôles réalisés	39
4.2.2.5. Position du rapporteur	39
4.2.3. Analyse dans le domaine fragile et de la transition fragile-ductile.....	41

4.2.3.1.	Défauts analysés.....	41
4.2.3.2.	Situations et charges.....	41
4.2.3.3.	Vieillessement.....	42
4.2.3.4.	Facteurs d'intensité de contraintes calculés.....	42
4.2.3.5.	Détermination de la RT_{NDT} admissible.....	43
4.2.3.6.	Position du rapporteur.....	44
4.2.3.6.1.	Défauts analysés.....	44
4.2.3.6.2.	Situations et charges.....	45
4.2.3.6.3.	Vieillessement.....	45
4.2.4.	Analyse dans le domaine ductile.....	46
4.2.4.1.	Proposition d'AREVA.....	46
4.2.4.2.	Position du rapporteur.....	46
4.3.	Détermination de la ténacité minimale et des propriétés mécaniques du matériau dans la zone ségréguée.....	46
4.3.1.	Proposition d'AREVA.....	46
4.3.1.1.	Représentativité de la calotte supérieure UK.....	46
4.3.1.2.	Actions déjà réalisées par AREVA.....	49
4.3.1.3.	Programme d'essais à venir : caractérisation des propriétés mécaniques de la zone ségréguée.....	50
4.3.1.4.	Laboratoires d'essais.....	54
4.3.2.	Position du rapporteur.....	55
4.4.	Comparaison de la ténacité minimale du matériau à la ténacité suffisante.....	59
4.4.1.	Proposition d'AREVA.....	59
4.4.2.	Position du rapporteur.....	61
4.5.	Conséquences de la démarche de justification sur la déclinaison du principe de défense en profondeur.....	64
5.	CONCLUSION GÉNÉRALE.....	65
ANNEXE 1 : TABLEAUX ET FIGURES		
ANNEXE 2 : EXIGENCES RÉGLEMENTAIRES ANTÉRIEURES		
ANNEXE 3 : PERFORMANCES DES CONTRÔLES		
ANNEXE 4 : ESTIMATION A PRIORI DU DÉCALAGE DE RT_{NDT} DANS LA ZONE DE SÉGRÉGATION MAJEURE POSITIVE		
ANNEXE 5 : TEMPÉRATURE DE RÉFÉRENCE T_0		
ANNEXE 6 : APPRÉCIATION DES INCERTITUDES, DES FACTEURS DE SÉCURITÉ ET DES MARGES		

Références

- [1] Directive 97/23/CE du Parlement européen et du Conseil du 29 mai 1997 relative au rapprochement des législations des États membres concernant les équipements sous pression
- [2] Décret du 2 avril 1926 portant règlement sur les appareils à pression de vapeur
- [3] Décret n° 99-1046 relatif aux équipements sous pression
- [4] Décret n°2007-534 du 10 avril 2007 autorisant la création de l'installation nucléaire de base dénommée Flamanville 3, comportant un réacteur nucléaire de type EPR, sur le site de Flamanville (Manche)
- [5] Arrêté du 26 février 1974 relatif à la construction du circuit primaire principal des chaudières nucléaires à eau
- [6] Arrêté du 12 décembre 2005 relatif aux équipements sous pression nucléaires, dit « arrêté ESPN »
- [7] Arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base
- [8] Règles techniques relatives à la construction des futurs CPP et CSP du 19 octobre 1999
- [9] Code RCC-M, édition 2007, AFCEN
- [10] Communication aux « 10 International forging conference Shiefield (UK) 23-25 sep 1985 » : « Application of Directional Solidification Ingot (LSD) in forging of PWR Reactor vessel heads – Benhamou, C. Poitrault ».
- [11] Note technique AREVA D02-PEE-F-15-0007 du 24 avril 2015 : « Calottes de cuve FA3 – Conception et fabrication »
- [12] Note technique AREVA D02-PEEM-F-15-0368 du 11 mai 2015 : « Démarche de justification du couvercle et du fond de cuve FA3 »
- [13] Note PFCSGN/NCR0003 révision B du 10 mars 2015 : « Programme d'essais sur pièce sacrificielle: première phase »
- [14] Note MDHTDM DT 15.020 révision A du 30 avril 2015 : « Programme d'essais sur calotte sacrificielle: détermination de la zone ségréguée majeure positive en carbone dans l'épaisseur »
- [15] Note PFCSGN/NCR0002 révision C du 30 juillet 2015 : « Programme d'essais sur calotte sacrificielle: essais mécaniques »
- [16] Note PFCSGN/NCR0004 révision A du 30 juillet 2015 : « Découpe de la zone ségréguée UK sup pour cartographie Carbone »

- [17] Note PFCSGN/NCR0005 révision A du 30 juillet 2015 : « Première étape du programme d'essai sur pièce sacrificielle UA inf »

Sigles, abréviations et dénominations

ASME :	American Society of Mechanical Engineers
ASTM :	American society for testing and material
ASN :	Autorité de sûreté nucléaire
CCAP :	Commission centrale des appareils à pression
CHB :	Centrale nucléaire de Chinon B
CL :	Creusot Loire (maintenant AREVA, établissement site Creusot Forge)
CT :	Compact Tension
DEP :	Direction des équipements sous pression nucléaires de l'ASN
EPR :	European Pressurized Reactor
ESPN :	Equipement Sous Pression Nucléaire
FA3 :	EPR de Flamanville 3
FSH :	Centrale nucléaire Fessenheim
GP ESPN :	Groupe permanent d'experts pour les équipements sous pression nucléaires
INB :	Installation nucléaire de base
IRSN :	Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire
JSW :	Japan Steel Works
LSD :	Lingot à solidification dirigée
MWe :	Mégawatt électrique
N4 :	Réacteurs français d'EDF de 1450 MWe (Civaux 1 et 2, Chooz B1 et B2)
NDT :	Nil Ductility Transition
OL3 :	EPR d'Olkiluoto 3
PS :	Pression maximale admissible
QT :	Qualification technique

RCC-M :	Règles de conception et de construction des matériels mécaniques des îlots nucléaires REP
RRA :	Circuit de refroidissement du réacteur à l'arrêt
R_m :	Résistance à la traction
RT_{NDT} :	Reference Temperature for Nil Ductility Transition
RT_{T_0} :	Reference Temperature T_0
SPN :	Section permanente nucléaire de la CCAP
TFP :	Trou à fond plat
T*TD :	Traitement thermique de détensionnement
TTQ :	Traitement thermique de qualité
US :	Ultrasons

1. Introduction

AREVA a demandé à l'ASN de procéder à l'évaluation de la conformité de la cuve destinée à l'EPR de Flamanville 3 en application de l'arrêté en référence [6].

Les calottes du couvercle et du fond de la cuve de Flamanville 3 ont été fabriquées en 2006 et 2007. AREVA a identifié ces composants comme présentant un risque d'hétérogénéité de leurs caractéristiques et a par conséquent réalisé une qualification technique.

Fin 2014, AREVA a informé l'ASN de résultats d'essais de résilience plus faibles qu'attendus, réalisés dans le cadre de cette qualification technique sur des éprouvettes prélevées sur une calotte représentative de celles destinées à Flamanville 3. Les valeurs mesurées sur deux séries de trois éprouvettes présentent une valeur moyenne de 52 joules ne permettant pas d'atteindre la qualité alors attendue par AREVA. Cette valeur moyenne est également inférieure à la valeur de résilience de 60 joules mentionnée au point 4 de l'annexe 1 de l'arrêté en référence [6], dont le respect aurait suffi à justifier la suffisance de la ténacité du matériau.

AREVA a réalisé des investigations pour déterminer l'origine de ces valeurs non conformes. Les mesures de concentration en carbone réalisées en surface de la calotte représentative par spectrométrie portative ont montré la présence d'une zone de ségrégation majeure positive (concentration en carbone élevée) sur un diamètre d'environ un mètre. Par ailleurs, les examens réalisés montrent que la ségrégation s'étend à une profondeur dépassant le quart de l'épaisseur de la calotte. AREVA explique le non-respect du critère de résilience par la présence de cette ségrégation majeure positive issue du lingot utilisé pour le forgeage et non totalement éliminées lors des opérations de chute.

Pour traiter cet écart, AREVA prévoit de justifier du caractère suffisamment tenace du matériau par la réalisation de nouveaux essais sur un matériau représentatif des calottes inférieure et supérieure du réacteur EPR de Flamanville.

Le corps de la cuve de Flamanville 3 dont fait partie la calotte inférieure a déjà subi une épreuve hydraulique en usine. Il a été installé début 2014 dans le puits de cuve situé dans le bâtiment du réacteur et soudé aux branches primaires. Le couvercle réalisé à partir de la calotte supérieure a fait l'objet de réparations suite à la découverte, lors des contrôles par ultrasons, d'indications dans les soudures des traversées des mécanismes de commande de grappes. Ces opérations de réparation avaient été examinées par le groupe permanent d'experts pour les équipements sous pression nucléaires lors de la séance du 14 septembre 2011. Les contrôles par ultrasons des nouvelles soudures ont depuis été réalisés et les travaux sont en voie d'achèvement. Le couvercle est toujours dans les ateliers du fabricant et devra faire l'objet d'une épreuve hydraulique avant son expédition sur site.

Le présent rapport rappelle le cadre réglementaire et l'historique de l'application de l'exigence de qualification technique, puis présente et analyse la démarche retenue par AREVA pour justifier de la ténacité suffisante du matériau des calottes de la cuve de l'EPR de Flamanville 3. Il se positionne notamment sur le programme de la nouvelle campagne d'essais proposé par AREVA pour évaluer les propriétés mécaniques de la zone ségrégée. Le rapporteur souligne toutefois que la justification de la ténacité suffisante a été définie dans le dossier d'AREVA sur la base d'une liste de situations de fonctionnement qui n'a pas pu faire l'objet d'une analyse dans le cadre de ce rapport compte tenu de la date tardive de transmission des éléments et du temps imparti.

Les résultats des nouveaux essais qui vont être réalisés, le caractère exhaustif et enveloppe des situations de fonctionnement retenues et l'impact des propriétés mécaniques de la zone ségrégée sur l'analyse du

comportement mécanique de la cuve en situations incidentelles, accidentelles et en situation d'épreuve seront analysés dans une phase ultérieure.

Le présent rapport a été élaboré conjointement par l'IRSN et la direction des équipements sous pression nucléaires (DEP) de l'ASN.

Le terme « rapporteur » utilisé dans le présent rapport désigne l'IRSN et les agents de la DEP ayant analysé le dossier d'AREVA en vue d'une présentation devant le groupe permanent d'experts pour les équipements sous pression nucléaires.

2. Cadre réglementaire et exigences applicables à la cuve de l'EPR de Flamanville 3

La réglementation applicable à la fabrication de la cuve de l'EPR de Flamanville est constituée des textes suivants :

- le décret n°99-1046 du 13 décembre 1999 relatif aux équipements sous pression en référence [3] qui transpose en droit français la directive en référence [1] ;
- l'arrêté du 12 décembre 2005 relatif aux équipements sous pression nucléaires (ESPN) en référence [6]. Au titre de cet arrêté, la cuve est un équipement de niveau N1¹, c'est-à-dire le plus important pour la sûreté.

Il est à noter que des dispositions transitoires de l'arrêté en référence [6] permettaient à AREVA, compte tenu de la date d'engagement de la fabrication de la cuve de Flamanville 3, d'appliquer la réglementation précédemment en vigueur (décret en référence [2] et arrêté en référence [5]). Cette réglementation mentionnait des valeurs de résilience comparables (voir Annexe 2).

Par ailleurs, l'EPR de Flamanville 3 est soumis à l'arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base en référence [7].

Enfin, le réacteur EPR de Flamanville 3 doit être conforme aux exigences fixées par le décret d'autorisation de création de l'installation en référence [4].

Le présent chapitre détaille les exigences réglementaires applicables à la conception et à la fabrication de la cuve de l'EPR de Flamanville 3 nécessaires à la bonne compréhension de l'analyse du dossier présenté par AREVA.

2.1. Défense en profondeur et exclusion de rupture

Défense en profondeur

La conception des installations nucléaires repose sur le principe de défense en profondeur, qui conduit à la mise en œuvre de niveaux de défense successifs (caractéristiques intrinsèques, dispositions matérielles et procédures), destinés à prévenir les incidents et accidents puis, en cas d'échec de la prévention, à en limiter les conséquences :

- le *premier niveau de défense* a pour objet de prévenir les incidents : pour les équipements, des dispositions sont définies pour assurer un haut niveau de qualité de leur conception et de leur fabrication ainsi qu'un haut niveau de garantie de cette qualité ;
- le *deuxième niveau de défense* a pour objet de détecter la survenue de tels incidents et de mettre en œuvre les actions permettant, d'une part, d'empêcher que ceux-ci ne conduisent à un accident et, d'autre part, de rétablir une situation de fonctionnement normal ou, à défaut, d'atteindre puis de maintenir le réacteur dans un état sûr. Pour les équipements, cela nécessite que leurs hypothèses de conception demeurent vérifiées au cours de l'exploitation, en particulier :
 - des dispositions d'exploitation permettent d'assurer que l'équipement est utilisé dans le

¹ L'arrêté en référence [6] définit les équipements de niveau N1 de la manière suivante : « Sont classés N1 les équipements sous pression nucléaires dont la défaillance peut conduire à des situations pour lesquelles le rapport de sûreté de l'installation nucléaire de base où ils sont installés ou destinés à l'être, complété par les dossiers associés, ne prévoit pas de mesures permettant de ramener l'installation dans un état sûr, ainsi que les équipements sous pression nucléaires constituant le circuit primaire principal et les circuits secondaires principaux des chaudières nucléaires à eau tels que définis par l'arrêté du 10 novembre 1999 susvisé ».

- domaine de fonctionnement défini par hypothèse à la conception,
- des dispositions de maintenance permettent d'assurer que l'équipement reste dans un état conforme à celui considéré au moment de la conception ;
 - le *troisième niveau de défense* a pour objet de maîtriser les accidents n'ayant pu être évités ou, à défaut, de limiter leur aggravation en retrouvant la maîtrise de l'installation afin de la ramener et de la maintenir dans un état sûr : pour les équipements, des dispositions sont mises en œuvre pour limiter les conséquences de leur défaillance ;
 - le *quatrième niveau de défense* a pour objet de gérer les situations d'accident consécutives à l'échec des dispositions des trois premiers niveaux de défense en profondeur de façon à en limiter les conséquences, notamment pour les personnes et l'environnement. Ce quatrième niveau permet de gérer les situations d'accident avec fusion de combustible ;
 - le *cinquième niveau de défense* concerne l'intervention des pouvoirs publics pour limiter les conséquences d'un accident pour le public et l'environnement.

Ces niveaux de défense sont suffisamment indépendants pour que la défaillance d'un niveau ne remette pas en cause la défense en profondeur assurée par les autres niveaux.

L'application du principe de défense en profondeur est demandée par l'article 3.1 de l'arrêté en référence [7].

Exclusion de rupture

Exclure la rupture d'un composant conduit à ce que sa défaillance ne soit pas postulée dans la démonstration de sûreté. Ainsi, aucune disposition n'est prévue au titre du troisième niveau de la défense en profondeur pour limiter les conséquences de sa défaillance. De ce fait, l'hypothèse d'exclusion de rupture nécessite de renforcer les deux premiers niveaux de la défense en profondeur pour atteindre un niveau de sûreté satisfaisant.

La rupture de la cuve est exclue au stade de la conception, de sorte que le principe de renforcement des deux niveaux de défense susmentionné s'applique à ce composant.

À cet égard, comme l'a rappelé la Section permanente nucléaire (SPN) de la Commission centrale des appareils à pression (CCAP), lors de sa réunion du 21 juin 2005 consacrée à l'exclusion de rupture des tuyauteries des circuits primaires et secondaires principaux du projet EPR, le premier niveau de la défense en profondeur « *est constitué de la garantie de la qualité à la fois de la conception, de la fabrication et du suivi en service, étant entendu que pour la conception et la fabrication, la garantie de la qualité est fondée à la fois sur la qualité des règles appliquées, la vérification de leur application et le contrôle final du résultat attendu. Les éléments constituant ce premier niveau sont tous de même importance.* »

Ainsi, au titre du premier niveau de défense, il est attendu :

- l'application de critères de conception et de fabrication les plus sévères permettant l'obtention de marges adéquates et cohérentes permettant d'écartier tout risque d'endommagement en exploitation ; au stade de la conception, des études de mécanique sont attendues en toute zone pouvant présenter un risque de rupture brutale ;
- l'utilisation de chargements enveloppes des sollicitations réelles dans les études de mécanique ;
- la définition et le contrôle des paramètres pouvant générer des défauts de fabrication, ainsi que l'établissement d'un programme de qualification justifiant la qualité atteinte sur l'ensemble des zones ; les contrôles de fabrication doivent être cohérents avec les objectifs de garantie de la qualité.

Au titre du deuxième niveau de défense, les dispositions prévues pour l'inspection en service doivent pouvoir apporter la garantie du maintien de l'intégrité du composant, c'est-à-dire l'absence d'altération au cours du temps remettant en cause la prévention des modes d'endommagement.

Dans le cas de la cuve, ces principes se déclinent pour les différentes étapes du processus de fabrication.

En premier lieu, un composant, issu du forgeage, doit présenter des caractéristiques mécaniques suffisantes indépendamment de son usage ultérieur. Cette exigence se traduit dans la réglementation des équipements sous pression et des équipements sous pression nucléaires en particulier, par le respect de critères portant sur les caractéristiques mécaniques.

Le composant subit par ailleurs un ensemble d'opérations d'usinage et de soudage. Ces opérations doivent être de la meilleure qualité possible à la fois en termes de réalisation et de contrôle. Elles doivent aussi être limitées au maximum pour limiter la présence de contraintes résiduelles.

Enfin, des éléments de justification et de validation doivent être apportés pour ce qui concerne le processus de fabrication et de contrôle ainsi que le comportement mécanique de l'équipement dans les différentes situations de fonctionnement (normal, essais, incidentel et accidentel). Les études de mécanique à la rupture brutale doivent permettre de démontrer le caractère « robuste » de la conception à des défauts relativement grands, définis de manière conventionnelle indépendamment des mécanismes pouvant en favoriser l'existence.

Le II-1 de l'article 2 du décret d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base de Flamanville 3 en référence [4] précise les dispositions spécifiques associées à l'exclusion de rupture.

2.2. Meilleures techniques disponibles

L'annexe 1 du décret en référence [3] impose au fabricant d'utiliser les meilleures techniques disponibles en précisant : « *les exigences essentielles doivent être interprétées et appliquées de manière à tenir compte de l'état d'avancement de la technique et de la pratique au moment de la conception et de la fabrication, ainsi que des considérations techniques et économiques compatibles avec un degré élevé de protection de la santé et de la sécurité* ».

Dans le cas de la cuve d'un réacteur, qui est un des équipements sous pression nucléaires les plus importants pour la sûreté (niveau N1) et pour lequel l'exclusion de rupture est postulée, le degré de protection de la santé et de la sécurité est nécessairement très élevé et limite très fortement la prise en compte de considérations économiques.

L'exigence d'utilisation des meilleures techniques disponibles contribue notamment au premier niveau de défense en profondeur.

2.3. Exigences essentielles portant sur les propriétés des matériaux et la qualification technique

Les exigences applicables aux circuits primaires et secondaires principaux des réacteurs nucléaires ont évolué depuis la construction du programme électronucléaire français, afin de prendre en compte le retour d'expérience, l'évolution des connaissances et les modifications du cadre réglementaire relatif aux équipements non nucléaires.

L'ASN a travaillé à la fin des années 1990 à définir les règles applicables aux futurs réacteurs, et

notamment le réacteur EPR, alors à l'étude. A cette occasion elle a saisi la section permanente nucléaire (SPN) de la commission centrale des appareils à pression (CCAP), qui a approuvé en octobre 1999 un document intitulé *Règles techniques relatives à la construction des circuits primaires et secondaires principaux des réacteurs nucléaires à eau sous pression*, diffusé par l'ASN par le courrier en référence [8].

Les exigences figurant dans ces règles techniques, et notamment les valeurs minimales des propriétés mécaniques, et les exigences de qualification préfiguraient les exigences de l'arrêté en référence [6] de décembre 2005.

Les exigences applicables à l'EPR de Flamanville 3 sur les matériaux et la qualification technique sont détaillées ci-dessous.

Les exigences des règles techniques, ainsi que celles de la réglementation antérieure en vigueur lors de la construction du parc électronucléaire français sont détaillées pour mémoire en Annexe 2.

2.3.1. Exigences sur les propriétés des matériaux

Le décret relatif aux équipements sous pression en référence [3], qui est applicable à tous les équipements, nucléaires ou non, exige (point 4.1.a de son annexe 1) que « *les matériaux destinés aux parties sous pression doivent [...] notamment être suffisamment ductiles et tenaces* ».

Ce décret stipule également (point 7.5 de son annexe 1) que « *un acier est considéré comme suffisamment ductile pour satisfaire au point 4-1 a) si son allongement après rupture dans un test de traction réalisé selon une procédure standard est au moins égal à 14 % et si son énergie de flexion par choc sur éprouvette ISO V est au moins égale à 27 J, à une température au plus égale à 20 °C, mais non supérieure à la plus basse température de fonctionnement prévue* ».

Pour les équipements sous pression nucléaires de niveau N1, les plus importants pour la sûreté, des valeurs minimales plus contraignantes ont été fixées par l'arrêté en référence [6]. Elles sont respectivement, pour des aciers du type de celui utilisé pour la cuve, égales à 20 % pour les valeurs d'allongement à 20 °C et 60 J pour l'énergie de flexion par choc à 0 °C. Ces valeurs, si elles sont respectées, sont considérées démontrer que le matériau est suffisamment tenace et ductile. Dans le cas où ces valeurs ne sont pas respectées, il appartient au fabricant de justifier de la mise en œuvre de dispositions appropriées permettant d'obtenir un niveau de sécurité global équivalent : « *les dispositions ci-après sont applicables en règle générale. Toutefois, lorsqu'elles ne sont pas appliquées, y compris dans les cas où les matériaux ne sont pas spécifiquement visés et où les normes harmonisées ne sont pas appliquées, le fabricant doit justifier de la mise en œuvre de dispositions appropriées permettant d'obtenir un niveau de sécurité global équivalent* » (point 7 de l'annexe 1 du décret en référence [3]).

2.3.2. Exigence de qualification technique

Pour les équipements sous pression nucléaires de niveau N1, l'exigence essentielle de sécurité définie au 3.2 de l'annexe 1 de l'arrêté [6] comme la « qualification technique » requiert que « *le fabricant identifie préalablement à la fabrication les composants qui présentent un risque d'hétérogénéité de leurs caractéristiques lié à l'élaboration des matériaux ou à la complexité des opérations de fabrication prévues. L'ensemble des opérations de la fabrication fait l'objet d'une qualification technique. Celle-ci a pour objet d'assurer que les composants fabriqués dans les conditions et selon les modalités de la qualification auront les caractéristiques requises* ».

La qualification technique des calottes de cuve porte sur l'élaboration du matériau qui présente un risque d'hétérogénéité de ses caractéristiques.

Pour l'évaluation de la conformité à cette exigence, la pratique actuelle conduit à ce que le fabricant introduise auprès de l'ASN, en préalable à l'élaboration du matériau d'un composant qu'il a identifié comme nécessitant une qualification technique, une demande d'évaluation de la conformité à cette exigence. Cette demande est accompagnée d'une documentation technique qui explicite notamment :

- la qualité attendue du matériau, issue de l'évaluation particulière du matériau qui doit définir les valeurs qui seront utilisées dans les calculs de conception ainsi que les caractéristiques essentielles du matériau et de sa mise en œuvre ;
- l'analyse des risques d'hétérogénéité de ces caractéristiques ;
- les essais destructifs et les essais non destructifs qui permettent de caractériser l'effet des hétérogénéités ;
- les modalités de mesure des paramètres de fabrication qui influent sur les risques d'hétérogénéité et dont l'impact n'est vérifié que sur un composant de qualification (paramètres dits essentiels).

Pour justifier de la maîtrise des propriétés qui ne peuvent pas être mesurées sur tous les composants, le fabricant peut être amené à réaliser une pièce sacrificielle sur laquelle il réalise les essais précités.

3. Historique de la démarche de qualification technique et cas spécifique des calottes de cuve de Flamanville 3

3.1. Présentation des caractéristiques principales de la cuve destinée au réacteur de Flamanville 3

Le schéma de la cuve de Flamanville 3 est présenté sur la Figure 1, ses composants sont listés dans le Tableau 1 et les matériaux des principaux composants sont identifiés dans le Tableau 2.

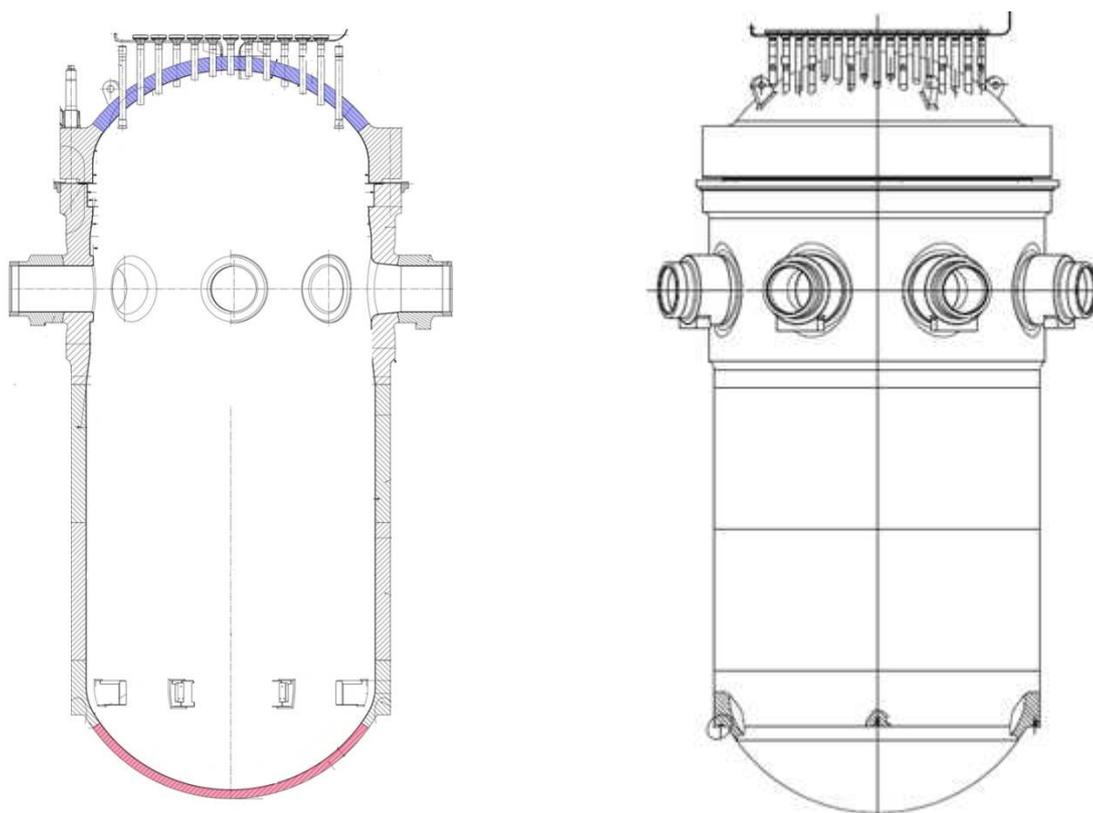


Figure 1 : Schémas de la cuve de Flamanville 3, les calottes sont identifiées en couleur

Corps de cuve	Couvercle de la cuve
<p>Les éléments suivants constituent le corps de cuve, du bas vers le haut :</p> <ul style="list-style-type: none"> - partie inférieure : <ul style="list-style-type: none"> - un fond inférieur (calotte), - un anneau de transition, - 8 guides de maintien radial. - virole cylindrique : <ul style="list-style-type: none"> - 2 viroles de cœur, - une virole porte-tubulure, - 4 tubulures d'entrée, - 4 tubulures de sortie, - 8 embouts de sécurité, - une collerette d'étanchéité, - un tube de détection de fuite. 	<p>Le couvercle de la cuve se compose des éléments suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> - une bride de couvercle ; - un dôme supérieur (calotte) ; - 89 tubes d'adaptateurs de MCG ; - 89 brides d'adaptateurs de MCG ; - 16 tubes d'adaptateurs d'instrumentation, équipées de cônes de guidage en partie basse ; - 16 brides d'adaptateurs d'instrumentation ; - un piquage d'évent ; - un piquage de mesure de la température du dôme, et son embout ; - 4 oreilles de levage.

Tableau 1 : Composants de la cuve

Les matériaux utilisés dans les approvisionnements de pièces sont ceux du tableau B2200 du RCC-M. Le tableau ci-dessous précise la spécification et la nuance de matériau applicables.

Composants	Spécification RCCM	Nuance
Bride/Virole porte-tubulure	M2112	16 MND 5
Tubulures	M2114	16 MND 5
Embouts de sécurité	M3301	Z2 CND 18 12 A azote contrôlé
Viroles de cœur	M2111 ou M2111 bis	16 MND 5
Anneau de transition	M2113	16 MND 5
Calotte inférieure	M2131	16 MND 5
Guides radiaux	M4102	Alliage 690
Bride de couvercle	M2113	16 MND 5
Calotte supérieure	M2131	16 MND 5
Tubes d'adaptateurs de MCG et d'instrumentation	M4108	Alliage 690
Brides d'adaptateurs de MCG et d'instrumentations	M3301	Z2 CN 19 10 A azote contrôlé
Pénétration de tube d'évent	M4109	Alliage 690
Tube d'évent	M3304 ou M3301	Z2 CND 17 12
Goujons	M2311	40 NCDV 7 03
Ecrous	M2312	40 NCDV 7 03
Rondelles	M2312	40 NCDV 7 03
Pénétration du tube de thermocouple et guide du thermocouple du dôme	M4109	Alliage 690
Tube du thermocouple du dôme et tube de connexion du thermocouple	M3304 ou M3306	Z2 CND 17 12 Z2 CND 18 12 A azote contrôlé
Tube de détection de fuite	M3301 ou M3306	Z2 CND 17 12

Tableau 2 : Matériaux des principaux composants de la cuve

Pour la conception et la fabrication de la cuve, AREVA a choisi d'utiliser le code RCC-M en référence [9] (édition 2007 complétée par certaines fiches modificatives).

La cuve du réacteur EPR comprend deux calottes (voir Figure 1), l'une constituant le fond de cuve et l'autre le couvercle de cuve. Pour le réacteur EPR de Flamanville, ces calottes ont été fabriquées par Creusot Forge, à partir d'un lingot plein, forgé, écrasé puis embouti.

La calotte du couvercle de la cuve est assemblée par soudage à la bride de couvercle. Cette calotte comporte 107 traversées pour les mécanismes de commande de grappes, l'instrumentation du cœur et le tube d'évent. Le diamètre extérieur de cette calotte est égal à 4720 mm pour une épaisseur de 232 mm.

La calotte du fond de la cuve est assemblée par soudage aux autres composants pour constituer le corps de cuve. Pour le réacteur EPR, le diamètre extérieur de cette calotte est égal à 4675 mm pour une épaisseur de 147 mm.

Les évolutions principales de la cuve destinée à l'EPR par rapport aux cuves installées sur le parc en exploitation sont les suivantes :

- il n'y a plus de pénétration dans le fond inférieur car l'instrumentation du cœur est introduite au moyen de pénétrations supplémentaires dans le couvercle de la cuve ;
- la bride du corps de cuve et la virole porte-tubulure proviennent d'une seule pièce forgée ;
- la soudure des tubulures est de type bout à bout.

3.2. Présentation du processus d'élaboration des calottes de la cuve de Flamanville 3 et historique des composants similaires

Pour choisir le procédé de fabrication des calottes du couvercle et du fond de la cuve de l'EPR, AREVA indique, dans son document en référence [11], s'être appuyé sur un examen des procédés utilisés pour la réalisation des calottes des couvercles et des fonds des cuves des réacteurs de 900 MWe, de 1300 MWe et de 1450 MWe. Toutes les calottes fabriquées pour le parc français ont été mises en forme par emboutissage à chaud d'un disque, les dimensions de ce disque variant d'un type de réacteur à l'autre. La différence de procédé de fabrication provient essentiellement du mode d'obtention du disque qui a successivement été obtenu :

- par découpage de tôles laminées pour les cuves des réacteurs de 900 MWe et pour cinq fonds de cuve de réacteurs de 1300 MWe ;
- par écrasement d'un lingot à solidification dirigée (LSD) puis usinage aux dimensions, pour l'ensemble des fonds et des couvercles de cuve des réacteurs de 1300 et de 1450 MWe, hormis les cinq fonds susmentionnés ;
- par écrasement de lingots conventionnels pour quatre couvercles monoblocs de remplacement de réacteurs de 900 MWe dont deux de ces couvercles ont été élaborés par Creusot Forge.

		Calottes de couvercle de cuve				
		A partir de tôles fortes embouties		A partir de flans forgés emboutis		
		MARREL	JSW	JSW lingot plein	Lingot LSD « Creusot »	Lingot plein « Creusot »
Palier 900 MWe	Tous sauf les 4 monoblocs	45 t				
Palier 900 MWe – Couvercle de type monobloc	Chinon B4 et Chinon B1			220 t		
	Cruas 3 et Chinon B3					195 t
Palier 1300 MW	Tous				58 t	
Palier N4	Tous				63 t	

		Calottes de fond de cuve				
		A partir de tôles fortes embouties		A partir de flans forgés emboutis		
		MARREL	JSW	JSW lingot plein	Lingot LSD « Creusot »	Lingot plein « Creusot »
Palier 900 MWe	FSH1 à CHB	34 à 40 t				
Palier 1300 MWe	Q1 A Q5		46 t			
Palier 1300 MWe	Q6 à Q20				46 à 49 t	
Palier N4	Chooz B1 à Civaux 2				55 t	

Tableau 3 : Evolution des poids de lingots et tôles utilisés pour les fonds et couvercles des différentes cuves françaises

Les principales évolutions de conception des calottes de cuve de l'EPR de Flamanville 3, comme indiqué précédemment, portent principalement sur l'absence de traversées dans le fond de cuve et l'augmentation significative de leur nombre dans le couvercle. En terme de dimension, la calotte de fond de la cuve EPR, tout en étant un peu plus large, n'est pas fondamentalement différente de celle de la cuve N4 et son épaisseur est quasi-identique. À titre de comparaison, les dimensions respectives ainsi que le nombre de traversées des calottes de cuves EPR et N4 sont donnés dans le Tableau 4.

	Calotte de couvercle		Calotte de fond de cuve	
	EPR	N4	EPR	N4
Épaisseur	230 mm	180 mm	145 mm	144 mm
Diamètre interne cuve	4885 mm	4486 mm	4885 mm	4486 mm
Rayon interne de courbure	2695 mm	2303 mm	2695 mm	2310 mm
Nombre de traversées	107	77	0	60

Tableau 4 : Comparaison des dimensions des calottes de cuve EPR et N4

Compte tenu des dimensions de la calotte du couvercle de la cuve de l'EPR, le disque requis est d'un diamètre de 5800 mm et d'une épaisseur de 300 mm, ce qui ne peut être réalisé, ni à partir de tôles, ni à partir du lingot à solidification dirigée du palier N4. AREVA considère notamment que, même si un lingot LSD de tonnage adéquat existait, la mise en forme à partir d'un tel lingot ne permettrait pas d'atteindre le taux de corroyage² supérieur à 3 préconisé par le RCC-M pour la réalisation des pièces forgées. Cette préconisation vise à favoriser les procédés de mise en forme permettant un corroyage suffisant du matériau de manière à en éliminer la plupart des défauts de solidification (retassures, porosités et soufflures).

AREVA Creusot Forge a donc mis en œuvre une gamme de fabrication pour les calottes de la cuve de l'EPR à partir d'un lingot conventionnel de 157 tonnes, dont les objectifs sont :

- les surfaces de la pièce finale à revêtir et les zones d'assemblage permanent doivent être exemptes de ségrégations majeures positives ;
- la zone de ségrégation majeure négative doit être éliminée afin de garantir des propriétés mécaniques de résistance suffisantes.

En effet, après coulée et solidification de l'acier, les pièces de grandes dimensions ne sont pas parfaitement homogènes du point de vue de la composition chimique et des propriétés mécaniques (voir Figure 2). 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 les lingots, on trouve en pied de lingot une forte 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 présente le risque de 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).

² Selon le RCC-M (M 380), le coefficient de corroyage représente, dans chaque région de la pièce, le rapport des longueurs d'un élément de métal, mesurées dans la direction parallèle à celle de corroyage, après et avant l'opération de forgeage. La direction de corroyage est, dans chaque région de la pièce, la direction dans laquelle l'opération de forgeage produit l'allongement maximal. Au paragraphe M 353, il est dit que « La valeur du coefficient de corroyage global selon M 380 ne doit pas, en règle générale, être inférieure à 3. »

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 risque lié à ces veines sombres concerne la soudabilité.

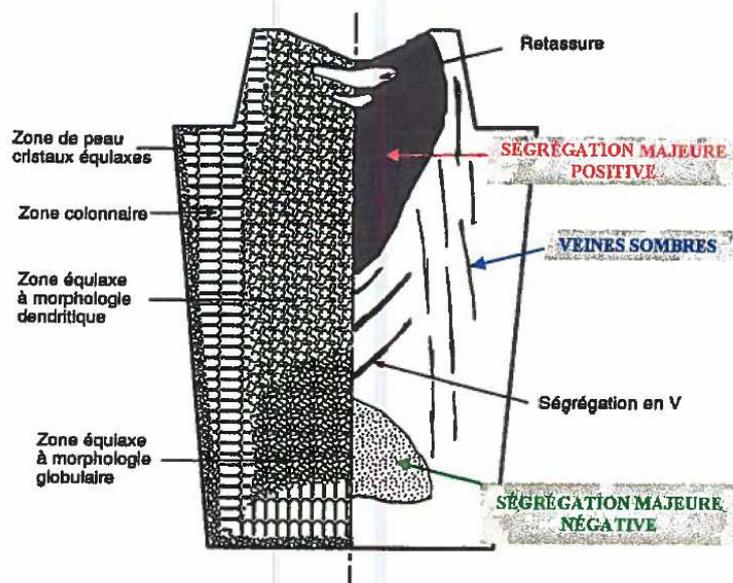


Figure 2 : Morphologie des ségrégations d'un lingot conventionnel

Le processus schématisé des opérations successives de forgeage des deux calottes de la cuve EPR de Flamanville 3 est présenté dans le Tableau 5. Pour l'élaboration de chacune des calottes destinées à l'EPR de Flamanville 3, après chute de la tête et du pied du lingot plein de 157 tonnes de type 2550, de l'ordre respectivement de 20 % et 8 % pour la calotte inférieure et de 20 % et 9 % pour la calotte supérieure, les flans subissent, avant emboutissage, un traitement thermique préliminaire destiné à réduire la teneur en hydrogène de l'acier et à faciliter l'usinage d'ébauchage du flan avant l'opération de mise en forme par emboutissage. Après emboutissage, un second usinage est réalisé pour l'ébauche des calottes au profil, en vue de leur « traitement thermique de qualité ». Les calottes sont toutes deux usinées dans une ébauche de 330 mm d'épaisseur obtenue par emboutissage d'un flan forgé de 450 mm d'épaisseur et de 6100 mm de diamètre issu d'un lingot de 157 tonnes. Des usinages réduisent l'épaisseur à 147 mm d'épaisseur nominale pour la calotte inférieure et à 232 mm pour la calotte du couvercle. Après l'usinage final, un contrôle volumique par ultrasons est réalisé.

Gamme forgeage	Calotte inférieure FA3	Calotte couvercle FA3
Lingot		
Bloomage		
Ecrasement entre plaque		
Ecrasement en passes parallèles		
Usinage en vue emboutissage		
Emboutissage		

Tableau 5 : Comparaison des gammes de forgeage des calottes inférieure et supérieure FA3

Pour des raisons de rationalisation de la production, la même gamme de forgeage a été conservée pour la calotte inférieure, bien moins épaisse. Ainsi, les calottes inférieure et supérieure suivent la même gamme de forgeage depuis la coulée du lingot jusqu'à l'opération d'emboutissage. Les séquences

réalisées après emboutissage jusqu'à l'usinage final au profil de livraison en vue de la réalisation des contrôles non destructifs sont présentées dans le Tableau 6.

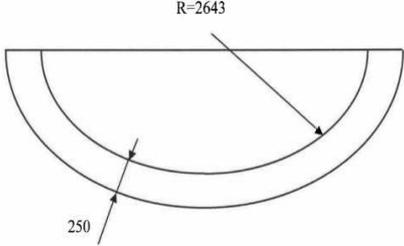
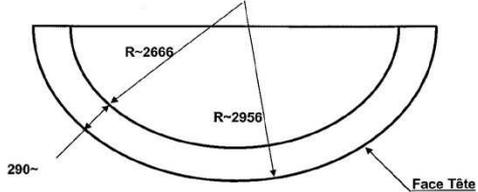
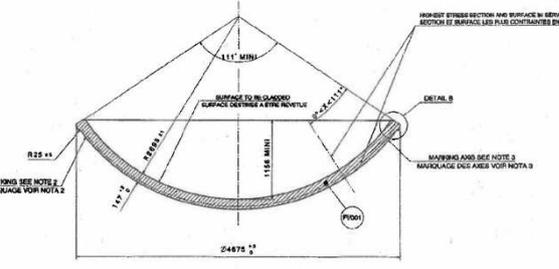
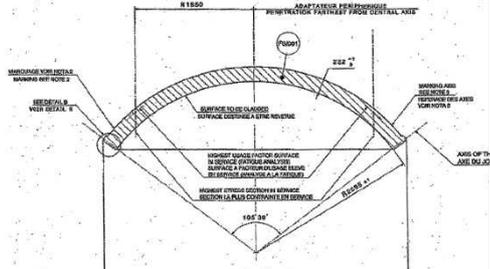
Gamme d'usinage	Calotte inférieure FA3	Calotte couvercle FA3
Usinage au profil pour Traitement de qualité (TTQ)		
TTQ		
Usinage au profil de livraison		

Tableau 6 : Séquences d'usinage après emboutissage

La gamme retenue par AREVA (Tableau 5) ne permet pas d'éliminer la zone de ségrégation majeure positive résiduelle dans la pièce finale. A cet égard, AREVA avait spécifié que le revêtement d'acier inoxydable serait à réaliser du côté pied du lingot, zone ne présentant pas de ségrégation majeure positive.

Cette gamme est similaire à celle mise en œuvre pour les couvercles de type monobloc réalisés par Creusot Forge. Toutefois, AREVA a indiqué que les couvercles de type monobloc avaient été fabriqués avec une teneur en carbone visée à la coulée de l'ordre de 0,16 %, inférieure à celle visée pour les calottes de l'EPR (0,18 %).

AREVA précise que Japan Steel Works (JSW) a également fait le choix d'un lingot conventionnel pour la réalisation des calottes de la cuve du réacteur EPR finlandais OL3. Toutefois, le procédé développé par JSW est spécifique et permet un positionnement de la pièce finale en dehors de la zone de ségrégation majeure positive située selon l'axe du lingot en partie supérieure. Ce procédé permet un balancement de la pièce dans le pied et sur les côtés du lingot (voir Figure 3). Dans ce cas, la face externe des calottes correspond au pied du lingot, contrairement au procédé de Creusot Forge. Ainsi, les calottes fabriquées par JSW sont exemptes de zones de ségrégation majeure positive.

AREVA a également fait réaliser les deux couvercles monobloc de remplacement du palier 900 MWe chez JSW avec cette gamme.

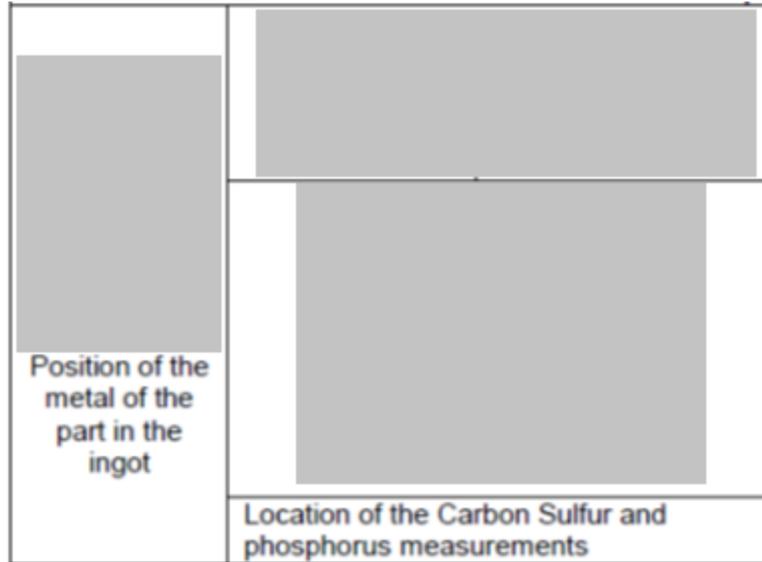


Figure 3 : Position de la pièce dans un lingot conventionnel réalisé par JSW

Pour mémoire, la section permanente nucléaire (SPN) de la CCAP avait examiné les choix de conception retenus pour la virole porte-tubulures de la cuve (lingot plein de 490 tonnes) et ceux retenus pour la fabrication du couvercle de la cuve au cours des séances des 2 juillet 2003 et 5 janvier 2006. Le procédé d'élaboration des calottes et leur conception n'avaient alors pas été spécifiquement examinés par la SPN. Toutefois, dans sa lettre de suite, l'ASN avait demandé d'approfondir l'analyse de faisabilité industrielle de la solution d'un couvercle de type monobloc, qui présente l'avantage de supprimer un joint soudé.

3.3. Dossiers déposés par AREVA jusqu'aux essais de 2014

3.3.1. Premier dossier de qualification technique des calottes de la cuve de Flamanville 3

Le présent paragraphe décrit le contexte dans lequel les fabrications des calottes de la cuve ont été réalisées, contexte qui dépasse le cas des calottes et concerne plus globalement toutes les pièces soumises à qualification technique au titre de l'arrêté en référence [6].

Les modalités de justification du respect de l'exigence de qualification technique sont aujourd'hui stabilisées ; ce n'était pas le cas lors de la fabrication des premiers gros composants du futur EPR de Flamanville 3, dans les années 2005 à 2007. Outre le fait que l'arrêté en référence [6] a été publié le 22 janvier 2006, la mise en place des modalités de justification de la qualification technique a pris plusieurs années.

Les échanges sur l'exigence de qualification technique se sont concentrés dès 2006 sur le développement d'une méthode générique de justification du respect de l'exigence. AREVA souhaitait utiliser la qualification M140 du RCC-M pour satisfaire l'exigence. L'ASN a indiqué que la qualification M140 ne pouvait pas tenir lieu de qualification technique, faute de répondre à l'ensemble de ses objectifs. En effet, la qualification M140 est une qualification industrielle qui ne vise pas à caractériser tout le volume du composant, mais seulement les zones analysées à la conception. Par ailleurs, elle peut reposer sur des essais réalisés sur des composants élaborés avec un autre programme technique de fabrication. A cet égard, on peut noter que les calottes de la cuve de l'EPR de Flamanville 3 ont obtenu leur qualification M140, mais pas leur qualification technique.

Par conséquent, les échanges sur le contenu technique de chacun des dossiers de qualification technique étaient, de fait, à cette époque, très limités. Il est à noter que la question d'un risque

d'hétérogénéité dans la zone centrale des calottes a cependant été abordée par l'ASN dès 2006. Cette question n'a pas reçu de réponse sur le fond, AREVA renvoyant alors à un futur dossier.

En 2007, malgré des évolutions significatives, le contenu des dossiers de qualification technique demeurait insuffisant pour apporter la justification de la gamme de fabrication choisie et du programme d'essais justifiant la maîtrise des risques d'hétérogénéité. L'ASN a alors décidé de mettre fin à cette situation qui permettait à AREVA de poursuivre la fabrication des pièces sans que des dossiers de qualification technique satisfaisants ne soient fournis en préalable. Ainsi, à partir du 1^{er} janvier 2008, l'ASN a conditionné toute nouvelle fabrication de composant à l'émission d'un dossier de qualification technique jugé recevable. La coulée du composant était donc dès lors conditionnée à la levée d'un point d'arrêt fixé par l'ASN. Ce point d'arrêt avait pour objectif de permettre à l'ASN de vérifier que le dossier de qualification technique était suffisamment abouti pour justifier les choix du programme technique de fabrication et pour permettre l'inspection des phases les plus sensibles de la fabrication. Ces points d'arrêt ne concernaient pas la fabrication des équipements dont les composants avaient déjà été élaborés, et qui de fait se poursuivait. L'ASN a mis en garde à plusieurs reprises AREVA sur le risque industriel que constituait le fait de poursuivre la fabrication des équipements sans que l'instruction des dossiers de qualification technique des composants entrant dans la fabrication de ces équipements sous pression nucléaires ne soit terminée.

L'introduction de points d'arrêt a incontestablement permis de faire progresser la qualité des dossiers de qualification technique. L'ASN a ainsi évalué les dossiers de qualification technique de nombreux composants du parc électronucléaire. En 2009, l'instruction de la qualification technique de composants destinés à des générateurs de vapeur de rechange a ainsi permis d'aboutir à un format des dossiers de qualification et une méthode d'analyse des risques d'hétérogénéité jugés satisfaisants par l'ASN. En parallèle, les échanges techniques sur les essais justifiant la maîtrise des risques hétérogénéité se poursuivaient. Par exemple, AREVA a proposé en 2011 de réaliser des pièces sacrificielles pour les composants élaborés à partir de lingots écrasés ou à géométrie complexe afin de caractériser les effets d'hétérogénéité après avoir travaillé dans un premier temps à des simulations numériques fondées sur les connaissances de l'élaboration des pièces forgées.

Pour les composants élaborés avant 2008, dont les calottes de la cuve de l'EPR de Flamanville 3, AREVA a décliné la démarche de qualification technique a posteriori. La réalisation des dossiers de qualification des calottes de cuve a ainsi été repoussée dans un premier temps à fin 2009. AREVA a finalement transmis à l'ASN une révision des deux dossiers de qualification technique en avril 2010, l'un pour la calotte supérieure et l'autre pour la calotte inférieure. Ces dossiers avaient toutefois été rédigés avant que les échanges entre les fabricants et l'ASN n'aient abouti à une pratique stabilisée des justifications techniques de maîtrise des risques d'hétérogénéité.

3.3.2. Analyse des écarts par rapport aux modalités de respect de l'exigence de qualification technique

Pour les composants de Flamanville 3 soumis à l'exigence de qualification technique, dont l'élaboration a débuté avant que les modalités du respect de cette exigence ne soient stabilisées, l'ASN a demandé à AREVA de fournir une analyse des écarts entre la pratique stabilisée de l'exigence de la qualification technique et celle antérieure appliquée par AREVA. Une première analyse a été réalisée en 2010 par AREVA, en complément des dossiers de qualification technique remis par AREVA. L'ASN a considéré début 2011 que cette analyse devait être complétée et a notamment demandé d'étudier la possibilité de s'appuyer, le cas échéant, sur des essais réalisés ou à réaliser sur d'autres composants représentatifs.

Début 2012, AREVA a ainsi transmis une nouvelle analyse pour tous les dossiers des composants destinés à l'EPR de Flamanville 3. Dans ce dossier, AREVA constate au vu de la pratique stabilisée que, pour les calottes de la cuve :

- l'effet du poids de lingot, du type de lingot et du taux de chute sur la présence et l'ampleur des ségrégations positives et négatives de carbone n'avait pas été caractérisé. En effet, le poids et le type de lingot conduisent à laisser après le chute des zones de ségrégations positives et négatives dans l'axe de la pièce (voir Figure 2). L'effet de ces paramètres est vérifié par des analyses chimiques et des essais mécaniques ;
- le temps de transfert entre la sortie du four de traitement thermique et le bac de trempe n'avait pas été identifié comme un paramètre influent, alors que ce temps influe sur les caractéristiques en peau du composant.

Suite à ce constat, AREVA a proposé à l'ASN de réaliser des essais sur une pièce élaborée dans les mêmes conditions que celles des calottes de Flamanville 3 pour vérifier l'effet de ces paramètres. Après des échanges techniques pour s'assurer de la représentativité de la pièce sur laquelle ces essais seraient conduits et obtenir du fabricant la définition de la qualité attendue dans les zones à caractériser, AREVA a soumis un dossier en 2012 à l'ASN par lequel il :

- justifie que la calotte supérieure approvisionnée dans le cadre du contrat UA chez Creusot Forge avec les mêmes paramètres d'élaboration que la calotte de cuve de Flamanville 3 est représentative de l'effet des ségrégations positives ou négatives de carbone ;
- propose de réaliser des essais mécaniques et des analyses chimiques dans une carotte de diamètre 80 mm prélevée dans la partie centrale de la calotte supérieure UA (voir Figure 4). Ces essais visent à caractériser l'effet du poids et type de lingot (analyse chimique en peau côté tête et pied dans l'axe de la pièce et essai mécanique dans l'axe de la pièce à $\frac{1}{4}$ épaisseur côté tête et pied), l'effet du taux de chute (analyse chimique en peau côté tête et pied dans l'axe de la pièce et essais mécaniques en peau côté tête et pied) et l'effet du temps de transfert (essai de traction en peau dans la partie la plus fine de la pièce, c'est-à-dire dans un excédent du coupon provenant du plan de joint) ;
- considère que la présence éventuelle de ségrégation résiduelle de carbone n'aurait pas d'impact sur les valeurs des essais mécaniques et ne modifie pas la qualité attendue initiale. AREVA a notamment précisé que « *la présence de ségrégation majeure résiduelle a peu d'impact sur les propriétés mécaniques de la pièce et qu'ainsi aucune décote des critères de recette minimum en traction et des critères sur les énergies de flexion par chocs n'est nécessaire dans ces zones* » et que « *cet aspect, localisé dans l'axe de la pièce sur la surface extérieure n'aura pas d'impact : sur les propriétés mécaniques [...].* »

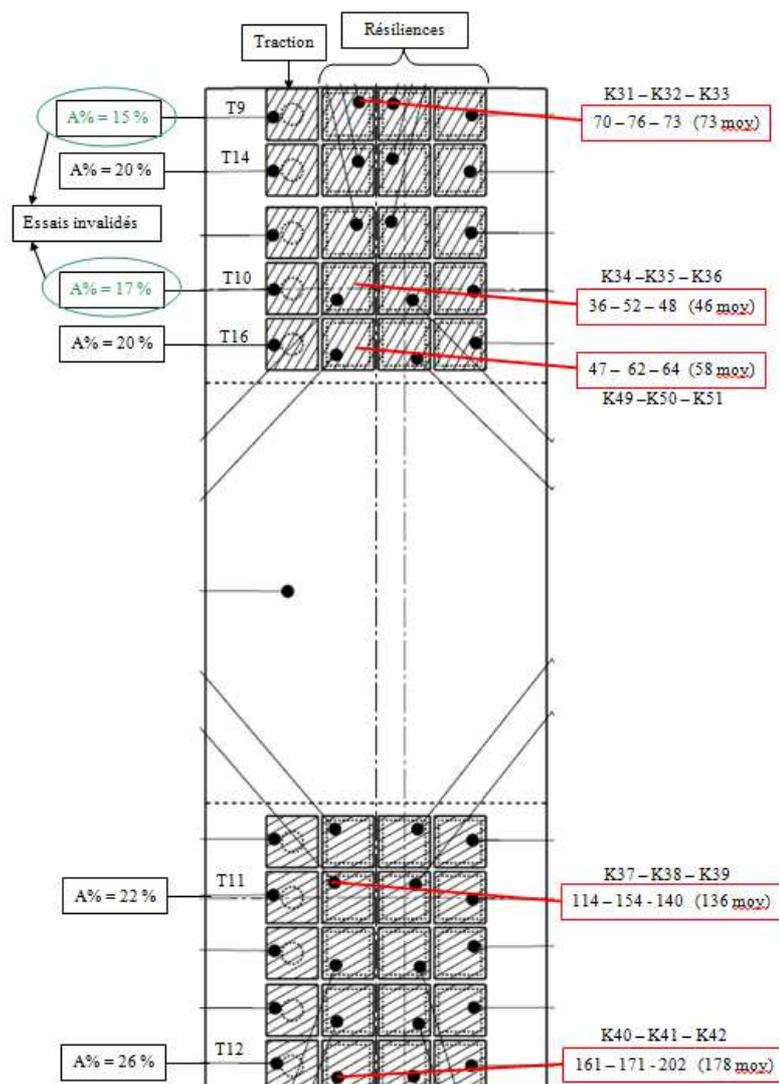


Figure 4 : Localisation des éprouvettes de traction et de flexion dans la carotte centrale de la calotte supérieure UA

Au vu ces éléments, l'ASN n'a pas émis d'objections aux opérations de carottage de la calotte supérieure UA et au programme des essais mécaniques associés.

3.3.3. Essais sur la calotte supérieure UA

Des résultats des essais sur la calotte supérieure UA, réalisés en 2014, il ressort que :

- deux essais de traction ont été invalidés (éprouvettes T9 et T10) car les éprouvettes ont rompu en dehors de la plage normalisée. Les deux éprouvettes T14 et T16 réalisées en remplacement ont donné des valeurs conformes ;
- deux séries de trois éprouvettes de résilience à ¼ épaisseur du côté tête ont conduit à des valeurs non conformes à celles mentionnées au point 4 de l'annexe 1 de l'arrêté en référence [6] et à la qualité attendue définie par le fabricant (60 J) : 36 J, 52 J et 48 J pour la première série et 47 J, 62 J et 64 J pour la seconde. La moyenne de ces valeurs est de 52 J.

A la suite de ces essais, le fabricant a réalisé des investigations pour déterminer l'origine de ces valeurs

en écart. Les mesures de carbone réalisées en surface de la calotte par spectrométrie portable ont montré la présence d'une zone de ségrégation majeure positive sur un diamètre d'environ un mètre légèrement désaxé par rapport au centre de la calotte (voir Figure 5). Par ailleurs, les examens métallographiques des éprouvettes montrent la présence de ces ségrégations à $\frac{1}{4}$ épaisseur. Les valeurs de résilience, inférieures à 60 J, sont ainsi attribuées à la présence de ségrégations majeures positives issues du lingot et non totalement éliminées par l'opération de chutage en tête.

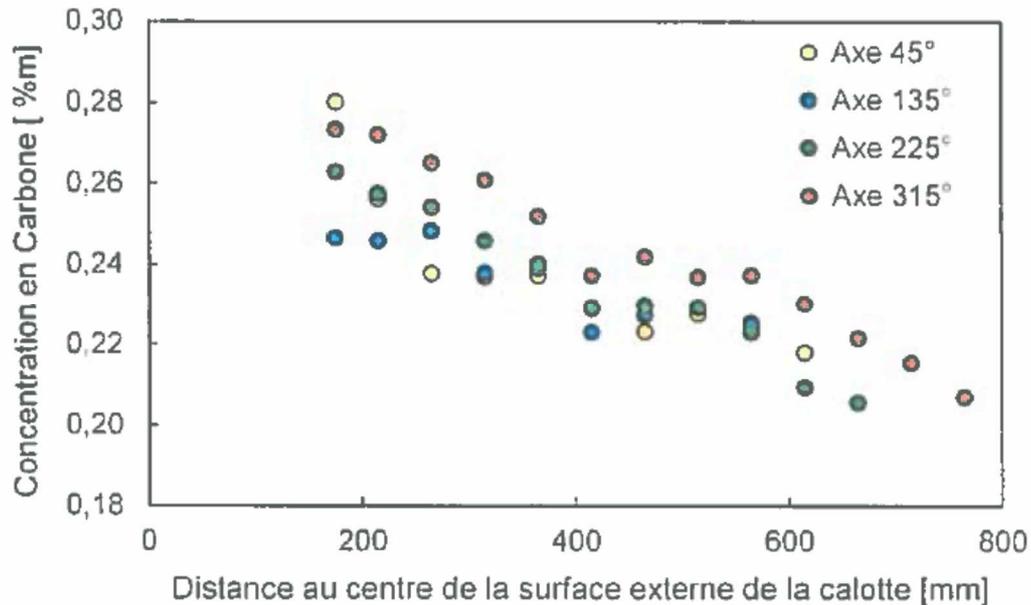


Figure 5 : Concentration en carbone en fonction de la distance au centre de la surface externe de la calotte supérieure UA

3.4. Position du rapporteur

Les calottes du fond et du couvercle ont été élaborées avec le même procédé et par le même fournisseur. Leur dossier de qualification technique a été élaboré par le fabricant avant que la pratique de cette exigence ne soit stabilisée, ce qui avait conduit l'ASN à émettre des réserves sur ces dossiers. La réconciliation de ces dossiers à partir de 2010 a conduit le fabricant à proposer des essais complémentaires. Ces essais ont montré que l'impact et l'étendue des zones de ségrégations majeures positives résiduelles au centre de ces calottes n'avaient pas été suffisamment anticipés.

Qualification M140 au titre du code RCC-M

Au cours de l'instruction, le fabricant a présenté la démarche de qualification des pièces imposée par le chapitre M140 du code RCC-M et la raison pour laquelle une telle démarche appliquée dès l'élaboration des composants destinés à Flamanville 3 n'a pas conduit à identifier le risque induit par une zone de ségrégation majeure positive résiduelle au centre des calottes. De l'explication d'AREVA, il ressort que :

- l'objectif du chapitre M140 du RCC-M est de demander au fabricant de vérifier pour les composants l'obtention d'un comportement satisfaisant au cours des opérations de mise en œuvre et en service ;
- les propriétés mécaniques sont par conséquent vérifiées prioritairement dans les zones qui présentent un intérêt au regard de l'utilisation du composant ;
- pour les calottes, ces zones ainsi identifiées sont la face revêtue qui correspond à la face pied du lingot et la zone soudée qui correspond au plan de joint des calottes. Ces zones ont été

caractérisées par des essais mécaniques et des analyses chimiques.

Une telle démarche n'a donc pas conduit AREVA à s'interroger sur les caractéristiques de la zone centrale, mais amène AREVA à la conclusion suivante : « *La problématique de ségrégation majeure en peau externe peut certes conduire à réduire localement le niveau de ténacité, mais ne conduit pas dans le cadre du RCC-M M140 à des vérifications particulières dans le cadre d'un programme d'essais de caractérisation. En effet, il n'y a pas de besoin fonctionnel identifié puisque le procédé de fabrication permet d'exclure la présence de défaut nocif – défaut perpendiculaire aux peaux soit les défauts exclus compte tenu de la gamme de forgeage – dans cette zone de ségrégation majeure positive, qui de plus, n'est pas sollicitée particulièrement en service (pas d'impact des chocs froids dans cette zone). Ainsi il n'y a pas de risque particulier identifié vis-à-vis de la rupture brutale [...] »³.*

L'application du chapitre M140 ne permet donc pas de justifier du respect de l'exigence de la qualification technique telle que définie au point 3.2 de l'annexe 1 de l'arrêté en référence [6], car selon AREVA, le chapitre M140 n'impose pas de s'intéresser à toutes les zones des composants, ce qui a pour conséquence de ne pas caractériser tout le volume. Le rapporteur souligne toutefois que, dans le cadre de l'application du chapitre M140, les évolutions de procédé de fabrication de pièces de cuve du parc en exploitation avaient fait l'objet d'une attention particulière de la part du fabricant afin de vérifier les propriétés mécaniques attendues.

Choix du procédé de fabrication par le fabricant

Le rapporteur considère que la présence de ces ségrégations découle du procédé, retenu par Creusot Forge, de fabrication des calottes à partir de lingots de fort tonnage. Ce procédé diffère de ceux employés pour les calottes des cuves des réacteurs du parc en exploitation et se différencie de celui mis en œuvre pour les couvercles de type monobloc en ce qui concerne la teneur en carbone visée.

Le phénomène de ségrégation est bien connu pour les pièces forgées issues de gros lingots et il a été largement étudié par le passé, en particulier pour les viroles de la zone de cœur des cuves de réacteur compte tenu notamment de son impact sur la teneur en élément ayant une influence sur le vieillissement sous irradiation. L'ampleur des ségrégations est liée à la masse du métal coulé pour obtenir les lingots et à leur géométrie (ratio hauteur/diamètre).

L'évolution des dimensions liées aux réacteurs de grandes puissances (1300 MWe et N4) a nécessité, par dépassement des capacités de laminage disponibles, de réaliser les calottes par emboutissage de flans forgés. Afin de limiter les risques liés aux phénomènes de ségrégation lors de la fabrication des pièces forgées, les industriels ont développé un lingot dit à solidification dirigée (LSD), breveté en 1978. La Figure 6 extraite de la publication en référence [10] illustre la différence de morphologie des zones de ségrégation entre un lingot LSD et un lingot plein conventionnel : la zone de ségrégation majeure positive d'un lingot LSD est plus superficielle que pour un lingot plein et moins étendue du fait de la différence de poids initial des lingots (chutage plus important pour un lingot plein) et surtout du pilotage du refroidissement.

³ Les aspects liés aux défauts et aux sollicitations sont traités au chapitre 4.

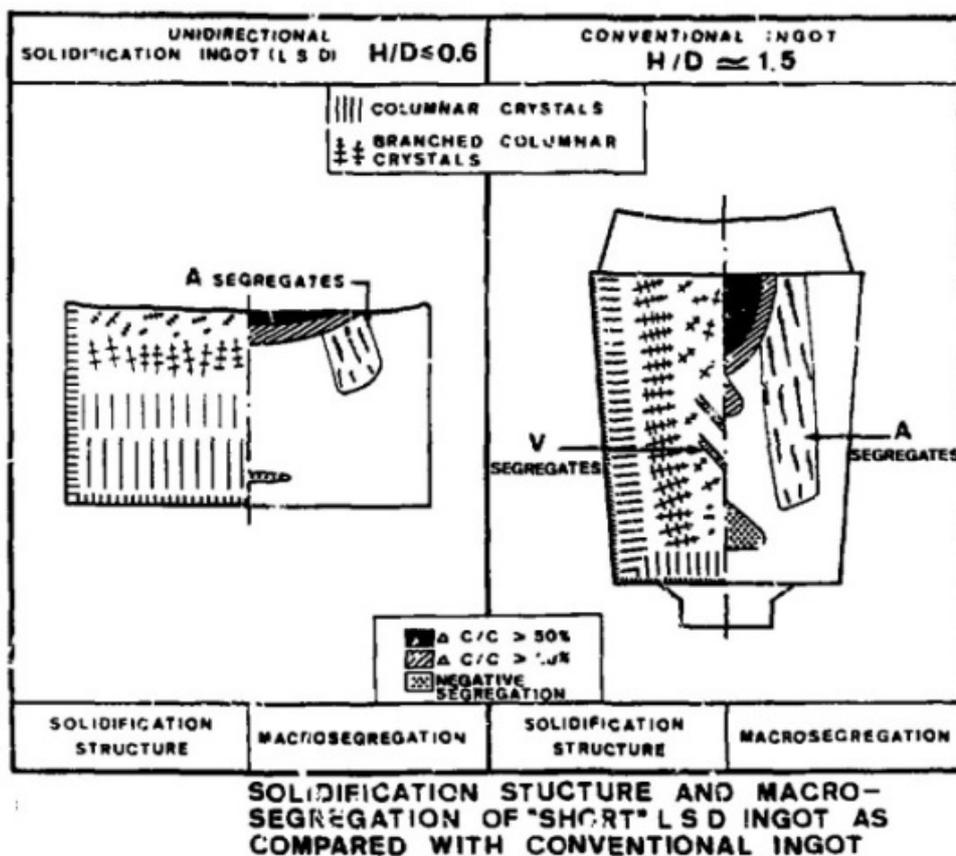


Figure 6 : Morphologie des ségrégations dans un lingot LSD et un lingot conventionnel

Les caractérisations faites à l'époque sur un flan expérimental d'épaisseur 210 mm issu d'un lingot LSD de 45 tonnes avaient confirmé que les ségrégations majeures caractérisées par le ratio $\Delta C/C$ ⁴ restaient inférieures à 23 %. La totalité des résultats obtenus sur le flan expérimental (analyses chimiques, caractéristiques mécaniques) respectait les exigences requises et avait montré que les essais de recette restaient représentatifs de l'ensemble de la pièce.

Pour ce qui concerne les calottes de cuve de l'EPR de Flamanville 3, le lingot de type 2550 utilisé est le lingot utilisé par le passé pour les viroles de cuve des réacteurs du palier 1300 MWe, dont la gamme de fabrication comprend un perçage à chaud du lingot, ce qui permet d'éliminer les ségrégations majeures positives situées en tête de lingot et dans sa partie axiale. Cette opération de perçage à chaud, inhérente aux pièces de révolution, n'est pas réalisable pour les calottes, ce qui avait conduit à retenir un lingot LSD pour les calottes de cuve des réacteurs du palier N4.

Le rapporteur note les trois orientations suivantes concernant la gamme de fabrication et sa définition :

- AREVA a renoncé à l'utilisation d'un lingot à solidification dirigée. Ce choix résulte de l'estimation du taux de corroyage lors du forgeage, jugé insuffisant par AREVA pour éliminer les défauts de solidification. Au stade de la conception, AREVA a privilégié « l'élimination » de ces défauts (taux de corroyage élevé, supérieur à 12, par rapport à ceux des couvercles du palier N4 de l'ordre de 3 à 5) au détriment d'un meilleur pilotage des phénomènes de ségrégation que

⁴ Pour un acier, la teneur en carbone mesurée à la coulée dans l'acier liquide (C) reflète la composition moyenne en carbone de l'ensemble d'une pièce. La différence avec la teneur locale en carbone mesurée à un endroit de la pièce (ΔC) permet de quantifier l'importance des ségrégations subsistantes ($\Delta C/C$).

le forgeage à partir d'un lingot à solidification dirigée aurait permis d'obtenir. Ce procédé, qui aurait nécessité des développements pour l'appliquer à l'EPR, aurait été favorable à l'homogénéité des propriétés mécaniques dans l'ensemble de la pièce fabriquée. Ainsi, AREVA a défini une gamme de forgeage à partir d'un lingot conventionnel de 157 tonnes conduisant à la présence d'une zone de ségrégation majeure positive dans la pièce ;

- compte tenu de ce premier choix, AREVA a veillé à ce que la zone de ségrégation majeure positive soit positionnée dans une zone où ses conséquences ne seraient pas rédhibitoires. La présence de ségrégations majeures positives affectant la soudabilité et la ténacité du matériau, la gamme de forgeage a été conçue de manière à ce que cette zone soit localisée en peau externe des calottes. La peau externe de la calotte est en effet une partie de la pièce où aucune soudure n'est prévue d'être réalisée. Par ailleurs, AREVA estime la peau externe « peu sensible aux chocs thermiques », donc a priori peu sujette au risque de rupture brutale. Ceci a eu pour conséquence d'obliger AREVA à différencier, dans sa gamme de fabrication, le côté du flan forgé situé du côté de la tête du lingot de celui du côté du pied. Ainsi AREVA a prévu des mesures de « détrompage » entre ces deux côtés au cours de sa gamme ;
- AREVA a défini sa gamme de forgeage de façon à éliminer la zone de ségrégation majeure négative afin de garantir des propriétés de traction minimales du matériau pour l'ensemble de la pièce.

Les arguments présentés par AREVA pour justifier la non-utilisation d'un lingot à solidification dirigée, développé pour la fabrication des calottes des cuves des réacteurs de 1300 MWe et de 1450 MWe, se fondent notamment sur les limitations des lingots LSD développées ci-dessus et leur incompatibilité avec les dimensions de la calotte de couvercle de l'EPR, supérieures aux fabrications précédentes. Le rapporteur considère que la possibilité d'adapter les lingots à solidification dirigée existants aux besoins de la réalisation de calottes de l'EPR aurait dû être considérée.

De plus, il faut souligner que les arguments présentés par AREVA ne s'appliquent pas à la calotte du fond de cuve, dont la masse, le diamètre et l'épaisseur sont moindres. Ainsi, les choix retenus pour la réalisation de la calotte du couvercle ont été reproduits, sans justification particulière, pour la réalisation de la calotte du fond de cuve.

Le procédé de fabrication développé par Japan Steel Works et mis en œuvre pour les calottes de cuve de l'EPR finlandais aurait également permis de répondre aux orientations qui ont été fixées au stade de la conception et, de plus, d'éliminer les zones à ségrégations majeures positives dans les calottes. Sur la Figure 3, est présenté le balancement de la pièce dans le lingot qui montre que la pièce finie est située en dehors des zones ségrégées.

L'utilisation d'un lingot de type 2550 pour les calottes de la cuve du réacteur Flamanville 3 a conduit à la présence dans la pièce finie d'une ségrégation majeure positive atteignant 50 %, valeur très supérieure à celles des mêmes types de pièces des réacteurs du parc en exploitation (maximum de 20 % à 25 %). Il faut noter que ces zones de ségrégation sur la calotte de fond de cuve et sur le couvercle du réacteur FA3 ont été confirmées en 2015 lors des examens réalisés par spectrométrie par étincelage (méthode non destructive d'analyse chimique) : les analyses chimiques qui avaient été effectuées au cours de la fabrication (quelques mesures de détrompage sur l'ébauche), avaient montré des concentrations en carbone importantes au centre de la calotte de couvercle du réacteur EPR de Flamanville, mais n'avaient pas conduit alors à s'interroger sur l'origine et les conséquences potentielles de celles-ci.

En ce qui concerne les deux couvercles de type monobloc fabriqués par AREVA chez Creusot Forge à partir d'un lingot conventionnel, l'ASN a interrogé EDF et AREVA pour savoir si des risques de même nature découlant de la présence d'une zone de ségrégation majeure positive existent. Le dossier est en

cours d'instruction. AREVA et EDF ont cependant apporté des éléments qui indiquent que le pourcentage de carbone à la coulée est plus faible pour ces couvercles de type monobloc (de l'ordre de 0,16 % pour les monoblocs contre 0,18 % pour les calottes FA3, à relier aux valeurs de résistance à la rupture R_m qui sont de l'ordre de 570 MPa pour les monoblocs et supérieures à 600 MPa pour les calottes FA3) et que des essais réalisés dans le trou destiné au passage de l'adaptateur numéro 3 (proche du centre) ont montré des valeurs de résilience plus élevées que celles obtenues sur Flamanville 3. Il est à noter que ces valeurs ont été obtenues sur des éprouvettes prélevées en sens travers court.

L'ASN a également demandé à EDF et AREVA de dresser l'inventaire de l'ensemble des composants susceptibles de présenter des zones de ségrégation majeure positive qui n'auraient pas été caractérisées lors de leur élaboration.

En conclusion, le rapporteur considère que :

- l'application du chapitre M140 ne permet pas de répondre à l'objectif de la qualification technique définie au point 3.2 de l'annexe 1 de l'arrêté en référence [6] ;
- le dossier de qualification technique présenté par AREVA pour les calottes du fond et du couvercle de la cuve de Flamanville 3 montre que le risque d'hétérogénéité dû aux ségrégations résiduelles positives a été mal apprécié et ses conséquences mal quantifiées. L'exigence de qualification technique n'est ainsi pas respectée par AREVA pour les calottes de la cuve et du couvercle de cuve destinées à Flamanville 3 ;
- AREVA n'a pas fait le choix de la meilleure technique disponible pour la réalisation des calottes de la cuve de l'EPR de Flamanville 3.

Ces constatations affectent le premier niveau de défense en profondeur qui vise l'obtention d'un haut niveau de qualité de conception et de fabrication du fait du non-respect des exigences rappelées ci-dessus.

Le rapporteur considère que le procédé de fabrication retenu ne procure pas la même garantie de qualité qu'auraient procurée la meilleure technique disponible et une qualification technique satisfaisante.

4. Démarche de justification proposée par AREVA

Compte tenu des éléments présentés au chapitre 3, AREVA doit justifier la suffisance de la ténacité du matériau par un autre moyen que le respect de la valeur de résilience mentionnée au point 4 de l'annexe 1 de l'arrêté en référence [6]. Cette démarche est présentée dans le présent chapitre.

Le rapporteur rappelle que le §4 de l'article 16 de l'arrêté en référence [5], en vigueur lors de la construction du parc électronucléaire français, aurait également amené le constructeur à conduire une telle démarche.

4.1. Principes de la démarche de justification

Les expertises réalisées sur la calotte sacrificielle UA ont montré que le matériau présente une énergie de flexion par choc à 0 °C ne respectant pas la valeur de résilience de 60 J mentionnée au point 4 de l'annexe 1 de l'arrêté en référence [6], en raison de la présence d'un niveau élevé de ségrégations dans la zone d'essais. Le niveau de résilience étant un indicateur du niveau de ténacité, la zone ségrégée pourrait donc présenter une ténacité insuffisante pour prévenir le risque de rupture brutale aux températures où l'acier est sollicité et notamment dans son domaine de transition fragile-ductile.

AREVA considère que la présence de ségrégations majeures positives ne remet pas en cause la prévention des dommages de déformation excessive et d'instabilité plastique des calottes de cuve, vérifiée dans le dossier de conception, du fait de la résistance à la traction plus élevée dans les zones de ségrégation positive. Le dossier d'AREVA est donc axé sur la prévention du risque de rupture brutale.

Pour ce qui concerne le domaine de transition fragile-ductile, AREVA a transmis sa démarche de justification du caractère suffisant de la ténacité des calottes de l'EPR de Flamanville 3, qui fait l'objet des notes en références [11] et [12].

La démarche de justification suivie par AREVA comprend 3 étapes principales illustrées sur la Figure 7 :

1. la détermination (par calculs) d'une ténacité suffisante pour prévenir le risque de rupture brutale, voir §4.2 ;
2. l'évaluation (par essais) de la ténacité minimale dans la zone de ségrégations majeures positives du matériau, voir §4.3 ;
3. la comparaison de la ténacité minimale du matériau à la ténacité suffisante déterminée, voir §4.4.

Dans le cadre de sa démarche, AREVA utilise la formule de l'annexe ZG 6110 du RCC-M (voir Figure 8) pour exprimer les ténacités suffisante et minimale et déterminer le décalage correspondant de la température de transition fragile-ductile de référence (RT_{NDT}^5):

- la RT_{NDT} suffisante est notée $RT_{NDT, admissible}$ sur la Figure 7 ;
- la RT_{NDT} minimale du matériau est notée $RT_{NDT, ZS, FA3}$ sur la Figure 7.

⁵ Le RCC-M définit la RT_{NDT} comme la température qui, augmentée de 33°C, correspond à une valeur d'au moins 68 J à l'essai de flexion par choc (Charpy).

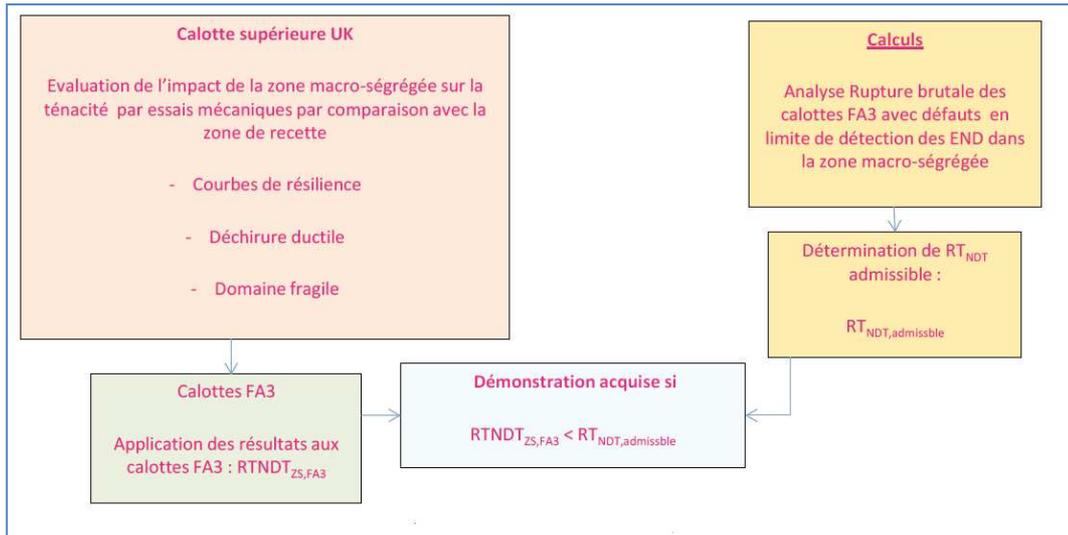


Figure 7 : Démarche générale de justification

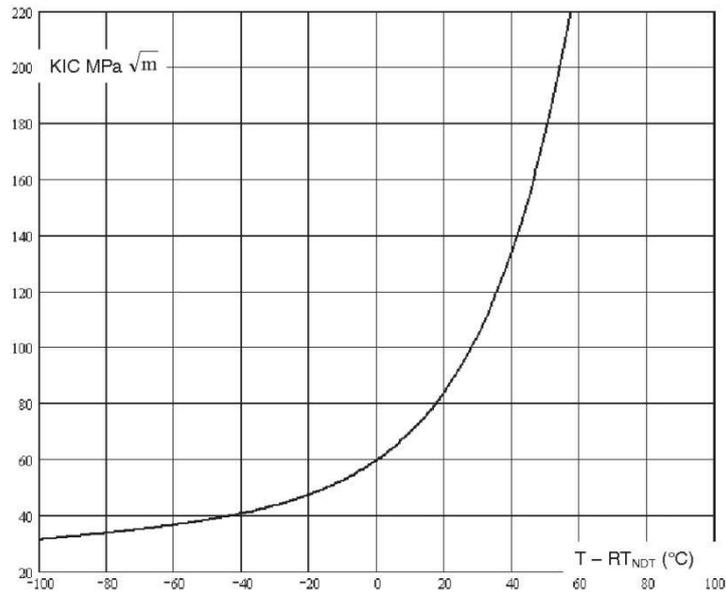


Figure Z G 6110

Courbe de ténacité de référence des aciers faiblement alliés couverts par les spécifications M.2110 et M.2120

L'expression analytique de la courbe est la suivante, dans le domaine $T - RT_{NDT} \leq 60^\circ\text{C}$.

$$K_{IC} = 40 + 0,09 (T - RT_{NDT}) + 20 e^{0,038 (T - RT_{NDT})}$$

où K_{IC} est exprimé en $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, et T ainsi que RT_{NDT} sont exprimés en $^\circ\text{C}$.

Figure 8 : Courbe ZG6110 du RCC-M indexée

L'effet du décalage de la température de transition (pour une sollicitation à température donnée) sur la ténacité est schématisé sur la Figure 9.

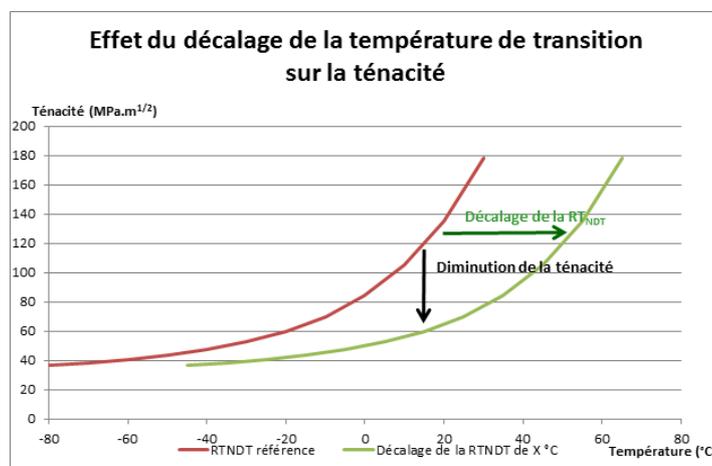


Figure 9 : Effet du décalage de la température de transition sur la ténacité

Enfin, AREVA a réalisé une estimation a priori du décalage de la température de transition RT_{NDT} dans la zone ségréguée (entre 35 ° et 70 °C, hors vieillissement), présentée en Annexe 4. L'impact de la zone ségréguée sur les propriétés mécaniques et en particulier sur la température de transition apparaît significatif en première approche. En effet, la RT_{NDT} de conception de la cuve étant de -20 °C, la RT_{NDT} de la zone ségréguée devrait être comprise entre 15 °C et 50 °C en début de vie.

La démarche d'AREVA pour le domaine ductile est par ailleurs présentée au §4.2.4.

4.2. Détermination de la ténacité suffisante

4.2.1. Définition de la ténacité suffisante

4.2.1.1. Proposition d'AREVA

AREVA énonce ainsi la définition qu'il retient de la ténacité suffisante : « Il sera considéré que le matériau présente une ténacité suffisante si les valeurs retenues pour les analyses de rupture brutale avec un défaut enveloppe de 10 mm de profondeur [...] permettent de garantir les marges requises pour l'exploitation à la conception, définies dans l'annexe ZG. »

Ainsi, pour AREVA, la ténacité suffisante est la valeur minimale de ténacité du matériau permettant de respecter les critères de l'annexe ZG du RCC-M pour prévenir le risque d'amorçage et de propagation instable de défaut. Cette valeur minimale est calculée en considérant :

- les défauts potentiellement présents dans le couvercle et le fond de cuve (cf. §4.2.2) ;
- les sollicitations auxquelles les défauts sont soumis dans les différentes situations ;
- les coefficients de marge sur les critères qui sont prévus par l'annexe ZG du RCC-M pour le risque de rupture fragile ou d'instabilité de la déchirure ductile, dépendant de la catégorie de la situation ⁶ (cf. Tableau 7).

⁶ Pour les situations d'épreuves hydrauliques, les critères retenus sont les mêmes que ceux retenus pour les situations de 3^{ème} catégorie (critères C).

CATEGORIE DE SITUATION	MARGE VIS-A-VIS DU RISQUE DE RUPTURE FRAGILE OU D'INSTABILITE DE LA DECHIRURE DUCTILE (1)	MARGE VIS-A-VIS DE L'AMORÇAGE DE LA DECHIRURE DUCTILE (2)	MARGE ENVELOPPE VIS A VIS DE L'AMORÇAGE ET DE L'INSTABILITE DE LA DECHIRURE DUCTILE (3)
Critères de niveau A	2	1,3	1,6
Critères de niveau C et épreuves	1,6	1,1	1,3
Critères de niveau D	1,2	-	1,0

Tableau Z G 3230 Marges de sécurité à respecter dans l'analyse de résistance à la rupture brutale vis-à-vis du risque d'instabilité et du risque d'amorçage, en fonction du niveau de critères

Tableau 7 : Coefficients de marge de l'annexe ZG 3230 du RCC-M

L'annexe ZG du RCC-M indique que : « la zone n'est déclarée robuste vis-à-vis de la résistance à la rupture brutale que s'il est apporté la justification qu'aucun défaut de taille supérieure au défaut justifié n'est possible compte tenu des procédés de fabrication mis en œuvre et des contrôles de la zone correspondante ». La ténacité suffisante se définit donc selon AREVA comme un niveau de ténacité tel qu'il permet d'empêcher la rupture brutale compte tenu des défauts potentiellement présents dans la structure sous l'action des sollicitations qui lui sont appliquées.

4.2.1.2. Position du rapporteur

Le rapporteur partage la notion de ténacité suffisante définie par AREVA.

4.2.2. Défauts potentiellement présents dans les calottes

Pour justifier la taille du défaut pris en compte comme le défaut le plus grand susceptible d'exister dans les calottes de fond et de couvercle de cuve, AREVA s'est inscrit dans le cadre de l'exigence du point 3.4 de l'annexe 1 de l'arrêté en référence [6]⁷ concernant la détection des défauts de fabrication spécifiés comme inacceptables. AREVA a ainsi défini en le justifiant le défaut inacceptable qui doit être détecté par les essais non destructifs réalisés lors de la fabrication.

4.2.2.1. Définition et justification du défaut inacceptable susceptible d'être présent dans les calottes à l'issue de leur fabrication

Dans le cadre de l'application de l'arrêté en référence [6], les échanges entre l'ASN et AREVA ont conduit à définir une démarche pour spécifier les défauts inacceptables et vérifier que les essais non destructifs sont suffisants. Appliquée aux calottes de la cuve de l'EPR de Flamanville 3, la démarche comporte les étapes suivantes :

- étape 1 : identification des défauts potentiels qui peuvent être générés par les procédés de fabrication mis en œuvre ;
- étape 2 : identification des parades qui sont mises en œuvre pour supprimer l'apparition des défauts potentiels qui

⁷ Point 3.4 de l'annexe 1 de l'arrêté en référence [6] : « Les essais non destructifs ont pour but la détection des défauts de fabrication spécifiés comme inacceptables ».

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 ;

- étape 3 : définition des défauts spécifiés comme inacceptables, 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 doivent être identifiés quantitativement et qualitativement ;
- étape 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 ;
- étape 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.

Pour définir et justifier le défaut inacceptable susceptible d'être présent dans les calottes à l'issue de la fabrication, AREVA a déroulé les gestes prescrits conformément aux modalités prévues pour l'élaboration des plaques tubulaires forgées destinées à des générateurs de vapeur de remplacement et acceptées par l'ASN dans le cadre de l'évaluation de la conformité des équipements concernés.

La comparaison des modes d'élaboration des plaques tubulaires et des calottes est résumée dans le Tableau 8 et montre que les défauts potentiels, jusqu'au stade « flan » des calottes sont les mêmes que pour les plaques tubulaires. Les opérations spécifiques d'emboutissage des calottes n'introduisent pas de risque spécifique de création de nouveau défaut, mais peuvent, dans la partie extradors des calottes, étirer des défauts préexistants. Cette analyse conduit AREVA à définir les défauts inacceptables comme ceux retenus dans le cas des plaques tubulaires des générateurs de vapeur de remplacement. Ils sont présentés dans le Tableau 9.

Opérations		Plaque Tubulaire RP1	Calotte		Défaut		
Stade	Procédé		Inférieure	Supérieure	Potentiel	Résidus attendus en fin de fabrication	Justification

Tableau 8 : Défauts potentiels attendus dans les calottes

Défauts	Origine	Caractéristiques (fin de fabrication)	Définition quantitative et qualitative des défauts inacceptables

Tableau 9 : Spécification des défauts inacceptables dans les calottes

4.2.2.2. Essais non destructifs réalisés sur les calottes

Les contrôles réalisés au stade de la fabrication sur les calottes du couvercle et du fond de la cuve de Flamanville 3 sont présentés dans la note d'AREVA en référence [11]. Ces contrôles sont les suivants.

- Contrôles réalisés au titre du code RCC-M

1. Contrôle visuel de toutes les surfaces au cours des différentes phases de fabrication et d'usinage.
2. Contrôle par ressuage des surfaces interne et externe des calottes après usinage final.
3. Contrôle volumique par ultrasons après usinage final ou à un stade aussi avancé que possible pour les parties non contrôlables au stade final.

Pour la détection des défauts parallèles ou quasi-parallèles aux peaux, tels que des défauts dus à l'hydrogène (DDH), les contrôles volumiques par ultrasons sont réalisés en ondes longitudinales droites (OL 0°) à 4 MHz à partir de la surface interne.

Pour étalonner en sensibilité le palpeur, un bloc de référence comportant des trous à fond plat (TFP) de diamètres 3 et 5 mm est utilisé. Le seuil de notation⁸ correspond à l'équivalent d'un TFP de diamètre 3 mm accompagné d'une atténuation de l'écho de fond rapide. Les seuils de rejet⁹ sont les suivants :

- indication ponctuelle isolée avec réflectivité supérieure à celle d'un TFP de diamètre 5 mm ;
- indications étendues ou groupées avec réflectivité supérieure à celle d'un TFP de diamètre 3 mm accompagné d'une atténuation rapide de l'écho de fond.

Pour la détection des défauts perpendiculaires aux peaux, les contrôles volumiques par ultrasons sont réalisés en ondes transversales à 45° (OT 45°) à partir de la surface interne, suivant 4 sens de sondage : 2 directions circonférentielles et 2 directions axiales (Figure 10).

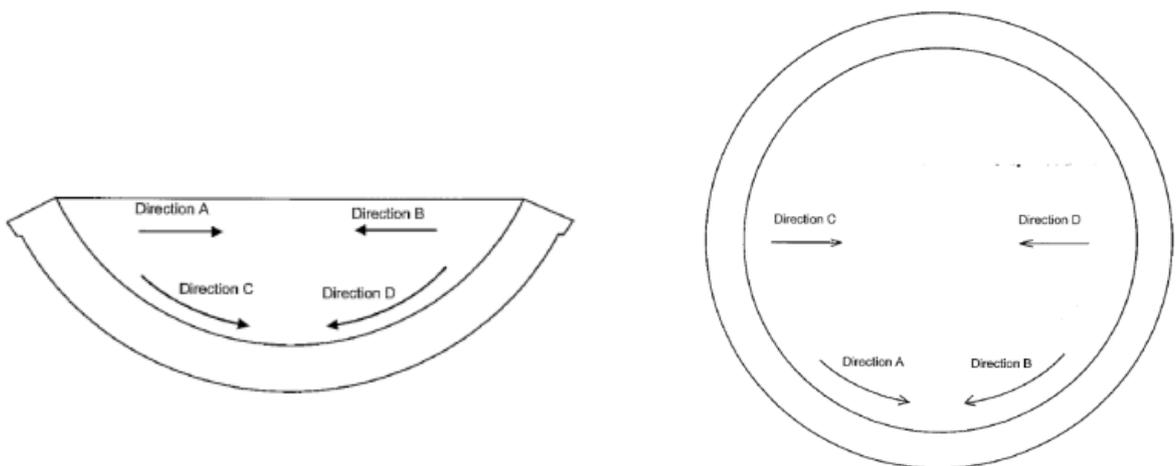


Figure 10 : Contrôle par US en ondes transversales à 45° réalisés sur les calottes et sens de palpage

⁸ Le seuil de notation correspond à l'amplitude de l'écho ultrason mesuré sur le défaut qui conduit à noter celui-ci dans le rapport de contrôle. Cette amplitude est définie en comparaison de l'amplitude de l'écho obtenue sur un réflecteur de référence tel qu'un trou.

⁹ Le seuil de rejet correspond à l'amplitude de l'écho ultrason mesuré sur le défaut qui conduit à ne pas accepter celui-ci.

L'étalonnage du palpeur OT 45° est réalisé sur un bloc de référence comportant des trous « génératrices » de diamètre 2 mm répartis dans l'épaisseur et servant à établir une courbe de correction d'amplitude en fonction de la distance (DAC). Le seuil de notation est le suivant : toute indication avec une amplitude supérieure à -6 dB de la courbe de référence est notée. Le critère de rejet est le suivant : toute indication supérieure à la courbe de référence.

- Contrôles réalisés en complément à ceux du code RCC-M :

Des contrôles complémentaires par ultrasons ont été réalisés sur les deux calottes. Il s'agit des mêmes contrôles que ceux requis par le RCC-M réalisés en ondes OL 0°, mais avec un gain supplémentaire de [redacted] afin de détecter de très petites indications.

4.2.2.3. Performances de détection

Des performances de détection sont indiquées par AREVA dans sa note en référence [11], pour les techniques par ultrasons destinées à la détection de défauts parallèles aux peaux et de défauts perpendiculaires aux peaux (considérés comme les plus nocifs, mais aussi selon AREVA, comme les plus improbables compte tenu de la gamme de forgeage).

Concernant les défauts parallèles aux peaux dont la détection est réalisée avec le palpeur OL 0° étalonné sur un trou à fond plat de 3 mm, AREVA annonce la détectabilité de défauts de 3 x 8 mm pour la calotte inférieure et de 3 x 10 mm pour la calotte supérieure.

Concernant les défauts perpendiculaires aux peaux, AREVA annonce des performances conventionnelles basées sur la détectabilité par les palpeurs OT 45° de « défaut ayant une surface réfléchissante orientée par rapport à l'angle de palpation ». De plus, AREVA indique que l'évaluation de la performance des contrôles peut être basée sur les travaux réalisés dans le cadre de l'EPR UK (même angle de palpation et sensibilité équivalente). Les principales conclusions de ces travaux sont rappelées dans le Tableau 10, extrait de [11].



Tableau 10 : Évaluation des capacités de détection des défauts réalisée dans le cadre de l'EPR UK

AREVA indique également que des résultats de simulation à l'aide du logiciel CIVA ont montré qu'un défaut plan de hauteur minimale 5 mm donnera une réponse ultrasonore supérieure au seuil de notation pour une distance entre la peau externe et le défaut n'excédant pas 20 mm, compte tenu de l'effet de coin.

Enfin, pour les défauts plans perpendiculaires aux peaux des calottes de la cuve de Flamanville 3, AREVA résume les performances en indiquant que sa détectabilité reste très dépendante de la « rugosité du défaut » :

- si le défaut est rugueux, la détection d'un défaut de dimensions 10 x 20 mm est garantie :
 - pour les défauts débouchants ou sous-jacents,
 - pour les défauts internes, si ceux-ci ne sont pas trop désorientés ;
- si le défaut est lisse, les contrôles ne permettent pas de garantir la détection pour les dimensions correspondant au défaut à surface rugueuse. Il reste toutefois détecté correctement lorsqu'il est débouchant ou présente un ligament¹⁰ par rapport à la surface, y compris avec une légère désorientation.

4.2.2.4. Résultats des contrôles réalisés

Au titre des contrôles du code RCC-M, aucune indication non conforme n'a été relevée pour les différentes techniques mises en œuvre (ressuage, ultrasons en ondes OL 0° et OT 45°).

Pour les contrôles par ultrasons réalisés en complément de ceux du code RCC-M, aucune indication n'a été relevée sur la calotte supérieure et quelques indications ponctuelles inférieures au seuil de notation amélioré, équivalent au trou à fond plat de diamètre 2 mm, ont été relevées sur la calotte inférieure.

En conclusion, sur la base des résultats des contrôles réalisés au stade de la fabrication sur les calottes du couvercle et du fond de la cuve de Flamanville 3, AREVA précise qu'il n'existe pas d'indication particulière lorsque les interprétations sont réalisées suivant les dispositions du code RCC-M.

4.2.2.5. Position du rapporteur

Le rapporteur ne remet pas en cause la définition et la justification des défauts inacceptables pris en compte par AREVA.

Par ailleurs, les performances annoncées par AREVA pour la détection par contrôles volumiques par ultrasons de défauts parallèles aux peaux n'appellent pas de remarque particulière. A cet égard, les contrôles complémentaires à ceux requis par le code RCC-M, qui améliorent la sensibilité du contrôle, renforcent la confiance à accorder à la capacité de détection de ce type de défaut.

Les performances indiquées par AREVA pour les défauts perpendiculaires à la peau externe sont globalement cohérentes avec le savoir-faire actuel. Elles sont confortées par des simulations faites dans le cadre de l'expertise de ce dossier (cf. Annexe 3). Il en résulte que des défauts plans à faciès rugueux ou lisses de 10 × 20 mm restent détectables lorsqu'ils sont débouchants ou présentent un petit ligament les séparant de la surface, y compris lorsqu'il existe une très légère désorientation comme cela est

¹⁰ Le ligament désigne la portion de métal sain existant entre le haut d'un défaut et la surface de la pièce contrôlée. L'absence de ligament ou un ligament faible conduit à classer le défaut comme débouchant.

mentionné pour l'étude EPR UK pour les défauts plans de type 2 ou 3 (cf. Tableau 10). Les contrôles ne permettent toutefois pas de garantir la détection des défauts « rugueux » et des défauts « très lisses » en particulier lorsque ces défauts sont éloignés de la peau externe et désorientés. Les défauts « très lisses » ne correspondent toutefois pas à des défauts réalistes pour le matériau considéré.

AREVA a réalisé des contrôles par ultrasons et justifié l'absence de défauts dans les deux calottes de Flamanville 3 sur la base d'une étude d'évaluation de performances des méthodes de contrôle par ultrasons réalisée dans le cadre de l'EPR UK et des résultats de contrôles obtenus. Le rapporteur partage les conclusions énoncées par AREVA sur la détectabilité des défauts plans et considère que les résultats permettent de conclure avec une confiance raisonnablement bonne à l'absence de défauts inacceptables dans les calottes.

Toutefois, pour ce qui concerne le contrôle de surface, le rapporteur estime que le contrôle le plus pertinent aurait été le contrôle par magnétoscopie, tel que requis par le code ASME SA 508. Ce contrôle n'a pas été réalisé par AREVA au stade de la fabrication qui a uniquement réalisé des examens visuels et un ressuage. La réalisation d'un contrôle par magnétoscopie aurait permis de renforcer la confiance donnée par les autres contrôles surfaciques, en particulier dans le cas de petits défauts débouchants, désorientés, éventuellement remplis d'oxyde et pouvant présenter une surface lisse.

À la fin de l'instruction, AREVA s'est engagé à :

- « transmettre un procès-verbal de ressuage du fond de la cuve de Flamanville 3, 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 de Flamanville 3 ;
- réaliser un contrôle par magnétoscopie en zone périphérique du couvercle de la cuve de Flamanville 3, qui est exempté d'adaptateurs ;
- transmettre des procès-verbaux de contrôle par magnétoscopie des calottes UA supérieure et inférieure ;
- répéter un contrôle par magnétoscopie et un contrôle par ressuage long sur la calotte UA supérieure, laquelle a subi une éprouve depuis le précédent contrôle magnétoscopique. »

Cette proposition ne comprend pas la réalisation d'un contrôle par magnétoscopie du fond ou du couvercle de la cuve de Flamanville 3. En effet, selon AREVA, le contrôle par magnétoscopie du fond de la cuve est *impossible* à réaliser car en « position plafond » et dans une configuration rendant la réalisation du contrôle dangereuse pour l'opérateur. AREVA estime par ailleurs que le contrôle par magnétoscopie du couvercle comporte des risques pour l'équipement, en particulier le risque d'introduire de la « liqueur magnétique » chargée de particules dans les interstices des adaptateurs et qui ne pourrait être enlevée ensuite, et de ce fait propose de limiter le contrôle par magnétoscopie à la zone périphérique du couvercle de Flamanville 3.

Le rapporteur partage l'appréciation des risques présentée par AREVA pour le contrôle du couvercle. Il considère de plus que les contrôles proposés par AREVA sur la zone périphérique de la cuve de Flamanville 3 ne présentent pas d'intérêt pour conforter l'absence de défauts dans la zone ségréguée.

En revanche, pour ce qui concerne les contrôles par magnétoscopie du fond de la cuve de Flamanville 3, le rapporteur considère qu'il est possible d'adapter la viscosité de la liqueur électromagnétique pour la réalisation de contrôles en « position plafond », compte tenu du fait que ce type de contrôle est par ailleurs réalisé sur d'autres composants en position verticale.

De plus, le rapporteur considère que les contrôles par ressuage proposés par AREVA sur la cuve de Flamanville 3 ne permettent pas de s'assurer de l'absence de petits défauts débouchants, désorientés,

éventuellement remplis d'oxyde et pouvant présenter une surface lisse. Enfin, le rapporteur considère que les contrôles proposés sur d'autres calottes ne sont pas de nature à conforter l'absence de défauts sur les calottes de la cuve de Flamanville 3.

En conséquence, le rapporteur formule la recommandation suivante

Recommandation 1

Le rapporteur recommande qu'AREVA réalise des essais non destructifs de surface complémentaires de ceux déjà réalisés dans le cadre de la fabrication pour conforter l'absence de défauts.

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

4.2.3.1. *Défauts analysés*

AREVA retient une des méthodes de l'annexe ZG du code RCC-M, à savoir l'analyse de rupture brutale dite « détaillée » (annexe ZG 4000). De ce fait, les défauts étudiés sont des défauts en limite de détection des procédés de contrôle et non un défaut de hauteur correspondant au minimum entre le quart de l'épaisseur et 20 mm comme demandé dans l'analyse « conventionnelle ».

Le défaut retenu par AREVA est débouchant en peau externe, placé dans la zone la plus sollicitée et sa taille est définie en adéquation avec la performance des moyens d'essais non destructifs en tenant compte d'une marge sur la taille de ce défaut (cf. §4.2.2).

Pour la calotte supérieure, il est considéré deux types de défauts :

- un débouchant en coin d'alésage d'adaptateur, de profondeur égale à 10 mm et semi-circulaire ;
- un débouchant en partie courante, entre deux adaptateurs, de profondeur égale à 10 mm et de longueur 60 mm.

Pour la calotte inférieure, le défaut considéré est un défaut débouchant en peau externe de profondeur égale à 10 mm et de longueur 60 mm.

Au titre de la robustesse, un défaut d'une profondeur égale à la mi-épaisseur des calottes en considérant la ténacité hors zone de ségrégation égale à la ténacité de la zone de recette est également considéré par AREVA. Ce défaut est soumis uniquement au chargement induit lors de l'épreuve hydraulique en usine (1,43 fois la pression maximale admissible PS).

4.2.3.2. *Situations et charges*

AREVA a identifié les situations de fonctionnement normal, incidentel ou accidentel du circuit primaire principal la chaudière qui pourraient amener à un niveau de contraintes élevé associé à une basse température au voisinage d'un défaut en zone ségrégée. AREVA estime que les situations pertinentes à considérer pour le risque d'ouverture d'un défaut situé en peau externe d'une calotte sont celles initiées par un choc chaud ou par une situation de forte pression, la cuve étant initialement froide. En effet, un choc froid tendrait à « fermer » les défauts en peau externe et n'est donc pas étudié.

AREVA conclut de son analyse que les sollicitations enveloppes conduisant à une ouverture du défaut sont les épreuves hydrauliques initiale et de requalification périodique et la situation de fonctionnement de passage de l'arrêt à froid à l'arrêt à chaud (AAF-AAC).

4.2.3.3. Vieillessement

AREVA estime que les calottes supérieure et inférieure ne sont pas sujettes au vieillissement sous irradiation : en effet, la calotte de fond de cuve est séparée de la plaque inférieure de cœur par plus d'un mètre d'eau et le flux de neutrons rapides est de l'ordre de 10^4 n/cm²/s (à comparer à un flux de 10^{10} n/cm²/s au niveau des viroles de cœur). La calotte supérieure est séparée de plus de 5 mètres d'eau, ce qui conduit à une réduction de flux de quelques décades supplémentaires. Pour de tels niveaux de flux et par conséquent de fluence, il n'est attendu aucun dommage dû à l'irradiation.

Les mécanismes de vieillissement potentiels des calottes sont donc le vieillissement sous déformation et le vieillissement thermique qui conduisent à un abaissement de la ténacité. Cet abaissement peut être exprimé par un décalage de la RT_{NDT} par rapport à la RT_{NDT} initiale.

Le vieillissement sous déformation est pris forfaitairement égal à 15 °C. Le vieillissement thermique, fonction de la teneur en phosphore du matériau, a été estimé entre 3 et 7 °C pour 60 ans de fonctionnement. Compte tenu du caractère enveloppe de la valeur forfaitaire attribuée au vieillissement sous déformation, AREVA retient au final une augmentation de la RT_{NDT} de 15 °C pour tenir compte de l'effet cumulé de ces deux vieillissements.

4.2.3.4. Facteurs d'intensité de contraintes calculés

Pour les situations de fonctionnement (choc chaud), AREVA précise que pour le défaut considéré (10 mm), le facteur d'intensité de contraintes maximal obtenu en situation de démarrage normal, seul cas de choc chaud prévu au dossier des situations, reste inférieur à l'asymptote historique (limite inférieure pour les faibles températures égale à $36,5 \text{ MPa.m}^{1/2}$) de la courbe de ténacité du RCC-M (Figure 11).

AREVA a par ailleurs précisé à la fin de l'instruction qu'il a identifié trois autres situations possibles de fonctionnement induisant un choc chaud, qui ne sont pas toutes prévues au dossier des situations :

- connexion du RRA consécutive à une petite brèche primaire (non prévue au dossier des situations ; cette situation serait à classer en catégorie 3) ;
- reprise de circulation naturelle en situation de petite brèche primaire (non prévue au dossier des situations ; cette situation serait à classer en catégorie 3) ;
- perte totale du refroidissement par RRA en état initial sur RRA (prévue au dossier des situations, classée en catégorie 4).

AREVA a également, au titre de la robustesse, identifié une situation de fonctionnement non prévue au dossier des situations, qu'il considère comme très peu plausible et dont la fréquence annuelle serait de l'ordre de 10^{-7} par an.

Pour l'ensemble des quatre dernières situations précitées, le facteur d'intensité de contraintes maximal obtenu dépasserait l'asymptote historique. Toutefois, d'après AREVA, ces situations ne peuvent pas conduire à un risque de rupture fragile, les situations d'épreuves hydrauliques restant nettement plus sévères.

En conclusion, AREVA considère que la ténacité est suffisante pour les situations de fonctionnement normal, incidentel et accidentel quelle que soit la valeur de la RT_{NDT} du matériau.

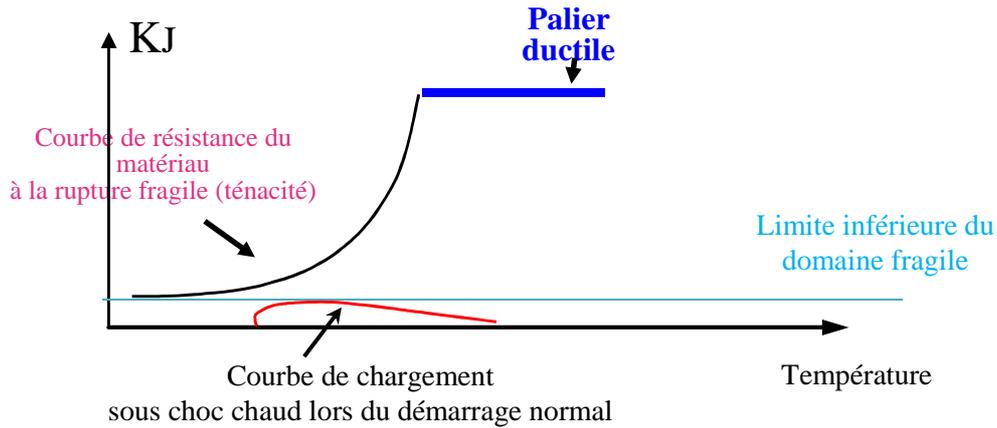


Figure 11 : Positionnement du chargement sous choc chaud lors du démarrage normal par rapport à la courbe de ténacité.

Selon AREVA, les analyses de risque de rupture brutale réalisées pour les défauts précités montrent que les épreuves hydrauliques constituent les chargements les plus pénalisants pour le couvercle et le fond de cuve et sont indiquées dans le Tableau 11 ci-dessous.

	Pression	Coefficient de marges selon RCC-M	Défaut (a x 2c en mm) / Localisation		$K_{cp} (*)$ en $MPa.m^{1/2}$
Épreuve initiale usine ou site	1,43 * PS 250 bar	1,6	10 x 20	Couvercle - coin d'adaptateur	63,4
			10 x 60	Fond de cuve	60,0
Épreuve de requalification périodique	1,2 * PS 210 bar	1,6	10 x 20	Couvercle - coin d'adaptateur	53,2
	1,2 * PS 210 bar		10 x 20	Couvercle - coin d'adaptateur	53,2

(*) avec prise en compte du coefficient de marge prévu par l'annexe ZG du RCC-M

Tableau 11 : Résultats des calculs de mécanique de la rupture pour les situations d'épreuve

4.2.3.5. Détermination de la RT_{NDT} admissible

Les valeurs du facteur d'intensité de contraintes K_{cp} obtenues permettent de calculer le paramètre ($T-RT_{NDT}$) limite selon la formule de ténacité minimale de l'annexe ZG 6100 du code RCC-M puis d'en déduire la RT_{NDT} admissible. Les calculs sont détaillés dans le Tableau 12 suivant.

	Température d'épreuve (°C)	K_{cp} (MPa√m)	T-RT _{NDT} (ZG 6100)	RT _{NDT} admissible (début de vie)
Initiale usine ou site	50 °C	63,4 (couvercle)	+5 °C	45 °C
	50 °C	60,0 (fond)	0 °C	50 °C
Requalification périodique	50 °C	53,2 (couvercle)	-8 °C	43 °C
	85 °C	53,2 (couvercle)	-87 °C	78 °C

Tableau 12 : RT_{NDT} admissible lors des épreuves hydrauliques

Les épreuves usines et initiales site sont en général réalisées à une température de 35 °C. Pour obtenir un point de comparaison, les calculs ont été réalisés à 50 °C dans les deux cas. Selon ces résultats, la RT_{NDT} acceptable en début de vie est de 45 °C pour une épreuve hydraulique en usine et de 43 °C pour une épreuve de requalification périodique, dans l'hypothèse où ces épreuves auraient lieu à 50 °C. Ainsi, AREVA obtient au final des décalages de RT_{NDT} admissibles comparables pour les différents cas d'épreuves hydrauliques à 50 °C. AREVA souligne que la température de l'épreuve hydraulique peut être augmentée si nécessaire, notamment pour les requalifications périodiques.

Enfin, l'analyse de la tenue mécanique lors de l'épreuve hydraulique en usine des calottes en présence de défauts d'une profondeur égale à la mi-épaisseur, dont la pointe serait située en dehors de la zone ségréguée, conclut à un rapport K_{IC}/K_{CP} supérieur à 1 en considérant des propriétés locales de ténacité similaires à celles de la zone recette et sans prendre en compte le coefficient de marges du RCC-M.

4.2.3.6. Position du rapporteur

4.2.3.6.1. Défauts analysés

Le rapporteur rappelle que le RCC-M (annexe ZG 1200) prévoit que le fabricant réalise une analyse de rupture brutale conventionnelle. Cette méthode d'analyse est notamment « dédiée » :

- à l'établissement des courbes P-T de pression admissible en service en fonction de la température ;
- à la détermination des températures minimales d'épreuve hydraulique. »

Le rapporteur note que le fabricant s'est limité à « l'analyse détaillée » sans réaliser « d'analyse conventionnelle ». Le rapporteur considère que « l'analyse détaillée » est acceptable pour déterminer une ténacité suffisante, permettant d'en déduire la température minimale pour se prémunir du risque de rupture brutale en situation d'épreuve. En revanche, le rapporteur estime que la température des épreuves qui seront réalisées en pratique doit être déterminée sur la base d'une « analyse conventionnelle » ainsi que le prévoit le code RCC-M.

À la fin de l'instruction, AREVA a pris l'engagement suivant :

- « 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 sensibilité, avec un défaut de 20 mm ;
- AREVA s'engage, pour le cas des épreuves sur 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 RCC-M, 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 industriellement raisonnable ;*
- *déterminer le défaut vérifiant strictement les critères du code RCC-M ;*
- *comparer celui-ci au défaut en limite de détection ».*

Le rapporteur considère que cet engagement est satisfaisant dès lors que le défaut vérifiant strictement les critères du code RCC-M est plus grand que le défaut en limite de détection.

4.2.3.6.2. Situations et charges

Compte tenu de la date tardive de transmission des éléments sur l'exhaustivité des situations retenues dans les analyses mécaniques, ceux-ci seront instruits ultérieurement par le rapporteur. À cet égard, le rapporteur s'attachera notamment à vérifier qu'AREVA a bien étudié toutes les situations de fonctionnement pertinentes pour s'assurer du respect des critères associés à la seconde barrière.

Dans la suite du présent rapport, l'analyse du rapporteur est fondée sur les éléments transmis par AREVA à ce stade.

Le rapporteur souligne que la sélection des situations limitatives et des chargements sollicitants a été menée en supposant que la baisse de ténacité due à la zone ségréguée s'étend de la surface externe de la calotte jusqu'à la mi-épaisseur. De ce fait, les situations ouvrant des défauts qui se situeraient au-delà de cette mi-épaisseur ne sont pas considérées, en particulier les chocs froids. Le rapporteur considère que cette hypothèse devra être validée par le programme d'essais (cf. §4.3).

4.2.3.6.3. Vieillessement

Sur la base de ses propres évaluations, le rapporteur partage la position d'AREVA sur le fait que la fluence n'est pas de nature à conduire à des dommages dus à l'irradiation.

AREVA retient forfaitairement un décalage de la RT_{NDT} de +15 °C pour tenir compte du vieillissement. Toutefois, compte tenu du caractère forfaitaire de la valeur et du peu de données sur le vieillissement thermique, le rapporteur estime que des compléments de justification sont nécessaires pour estimer l'effet du vieillissement thermique dans le cas de ce matériau dont la composition chimique est en écart par rapport aux matériaux étudiés auparavant.

Compte tenu du peu de données sur le vieillissement thermique de pièces fortement ségréguées durant 60 années de fonctionnement, le rapporteur considère qu'un programme d'essais est nécessaire pour confirmer le faible vieillissement thermique des zones fortement ségréguées de l'acier 16MND5 des calottes de la cuve de Flamanville 3.

À la fin de l'instruction, AREVA a transmis des éléments en complément de ceux de son dossier initial, faisant état d'études menées antérieurement par EDF, le CEA, FRAMATOME et WESTINGHOUSE. À partir de ces éléments, « *EDF et AREVA 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 rapporteur estime cet engagement satisfaisant. Le nouveau dossier qu'AREVA s'engage à fournir devra permettre de statuer sur la nécessité d'engager un programme spécifique sur le vieillissement thermique des pièces fortement ségréguées.

4.2.4. Analyse dans le domaine ductile

4.2.4.1. *Proposition d'AREVA*

AREVA propose de s'assurer du bon comportement des calottes de cuve dans le domaine ductile par :

- l'évaluation de la ténacité suffisante pour assurer les marges requises par l'annexe ZG du RCC-M pour la situation la plus défavorable de fonctionnement ;
- l'évaluation de la ténacité du matériau dans le domaine ductile à partir d'essais sur éprouvettes de ténacité.

Plusieurs essais de ténacité dans le domaine ductile seront réalisés permettant de vérifier que la ténacité minimale du matériau est supérieure à la ténacité suffisante.

4.2.4.2. *Position du rapporteur*

Le rapporteur n'a pas d'observation particulière sur la démarche d'AREVA.

4.3. Détermination de la ténacité minimale et des propriétés mécaniques du matériau dans la zone ségrégée

4.3.1. Proposition d'AREVA

L'objectif du programme d'essais proposé par AREVA en références [13] à [17] est d'évaluer :

- l'étendue de la zone ségrégée ;
- les caractéristiques mécaniques des zones fortement ségrégées, et principalement la ténacité.

Ce programme d'essais est réalisé sur une calotte supérieure sacrificielle d'une cuve EPR, dite UK, issue de la même gamme de fabrication que les calottes de la cuve de Flamanville 3 et fabriquée également chez Areva Creusot forge.

La première étape du programme d'essais, déjà réalisée, a consisté à déterminer l'étendue de la zone de ségrégation positive en surface et dans l'épaisseur de la calotte supérieure sacrificielle UK par dosage du carbone.

La seconde étape du programme d'essais concerne les essais de caractérisation des propriétés mécaniques de la zone ségrégée localisée à l'issue de la première étape du programme d'essais.

4.3.1.1. *Représentativité de la calotte supérieure UK*

Les procédés d'élaboration des calottes de FA3, UK et UA ont fait l'objet d'une analyse comparative de la part d'AREVA de manière à pouvoir conclure sur la représentativité de la calotte supérieure UK par rapport aux calottes FA3.

Composition chimique

La composition chimique de la calotte supérieure UK est quasi-identique à celle des calottes de la cuve de Flamanville 3. Les légères différences dans la teneur de certains éléments chimiques ne sont pas susceptibles de conduire à des écarts notables sur les caractéristiques mécaniques (Cf. Tableau 13 et Tableau 14).

	FA3		UA		UK	
	Calotte supérieure		Calotte supérieure		Calotte supérieure	
	Requis	RVR 2403	Requis	RVR 2944 RC	Requis	RVR 3365
C	0,20 maxi	0,18	0,20 maxi	0,18	0,20 maxi	0,19
Mn	1,15 - 1,55%	1,55	1,20 - 1,50%	1,46	1,15 - 1,55%	1,57
P	0,008 maxi	0,003	0,008 maxi	0,004	0,008 maxi	0,005
S	0,005 maxi%	0,001	0,005 maxi%	0,001	0,005 maxi%	0,001
Si	0,10 - 0,30%	0,17	0,15 - 0,30%	0,18	0,10 - 0,30%	0,20
Ni	0,50 - 0,80	0,72	0,50 - 0,80	0,71	0,50 - 0,80	0,71
Cr	0,25 maxi	0,17	0,25 maxi	0,18	0,25 maxi	0,16
Mo	0,45 - 0,55	0,51	0,45 - 0,55	0,49	0,45 - 0,55	0,52
V	0,01 maxi	0,001	0,01 maxi	0,005	0,01 maxi	0,001
Cu	0,10 maxi	0,04	0,10 maxi	0,04	0,10 maxi	0,06
Al	0,04 maxi	0,02	0,04 maxi	0,01	0,04 maxi	0,01
Co	0,03 maxi	0,01	0,03 maxi	0,01	0,03 maxi	0,01
H2	1,5 ppm maxi	0,95 ppm	1,5 ppm maxi	0,94 ppm	1,5 ppm maxi	1,10 ppm

Tableau 13 : Comparaison des compositions chimiques des calottes supérieures FA3, UA et UK

	FA3		UA		UK	
	Calotte inférieure		calotte inférieure		calotte inférieure	
	Requis	RVR 2473	Requis	RVR 3195 RC	Requis	RVR 3370
C	0,20 maxi	0,18	0,20 maxi	0,18	0,20 maxi	0,18
Mn	1,15 - 1,55%	1,55	1,20 - 1,50%	1,45	1,15 - 1,55%	1,58
P	,008 maxi	0,004	,008 maxi	0,004	0,008 maxi	0,005
S	0,005 maxi%	0,001	0,005 maxi%	0,001	0,005 maxi	0,001
Si	0,10 - 0,30%	0,18	0,15 - 0,30%	0,20	0,10 - 0,30%	0,18
Ni	0,50 - 0,80	0,75	0,50 - 0,80	0,69	0,50 - 0,80	0,71
Cr	0,25 maxi	0,14	0,25 maxi	0,15	0,25 maxi	0,16
Mo	0,45 - 0,55	0,51	0,45 - 0,55	0,50	0,45 - 0,55	0,51
V	0,01 maxi	0,001	0,01 maxi	0,001	0,01 maxi	0,001
Cu	0,10 maxi	0,04	0,10 maxi	0,03	0,10 maxi	0,06
Al	0,04 maxi	0,02	0,04 maxi	0,01	0,04 maxi	0,01
Co	0,03 maxi	0,010	0,03 maxi	0,004	0,03 maxi	0,009
H2	1,5 ppm maxi	0,95 ppm	1,5 ppm maxi	0,6 ppm	1,5 ppm maxi	1,07 ppm

Tableau 14 : Comparaison des compositions chimiques des calottes inférieures FA3, UA et UK

Gamme de fabrication

La gamme de fabrication des calottes supérieures et inférieures est identique :

- même type et poids de lingot ;
- même gamme et séquence de forgeage ;
- même dimension de flan ;
- même consigne de traitement thermique de précaution ;
- même ébauche avant emboutissage ;
- même emboutissage.

La principale différence dans la gamme de fabrication entre les calottes supérieures et les calottes inférieures réside dans leur usinage compte tenu de leur épaisseur au profil final : 232 mm pour la calotte supérieure, 147 mm pour la calotte inférieure. Cette différence apparaît à partir de l'usinage de l'ébauche avant le traitement thermique de qualité (à ce stade, les calottes inférieures présentent une épaisseur de 250 mm alors que les calottes supérieures ont une épaisseur de 290 mm). L'usinage en peau externe au centre des calottes est légèrement plus important pour la calotte inférieure comme le montre le Tableau 15.

Calotte supérieure		FA3	UA	UK	Calotte inférieure		FA3	UA	UK
Usinage total	Surface externe	71	65	76	Usinage total	Surface externe	108	92	115
	Surface interne	37	127	163		Surface interne	155	197	194

Tableau 15 : Epaisseur usinée (en mm) au centre des calottes supérieures et inférieures

Après le forgeage et avant l'usinage, les calottes subissent un traitement thermique de qualité (TTQ) consistant en une trempe et un revenu¹¹. Le traitement thermique de qualité est comparable pour les calottes supérieures de FA3 et UK (Cf. Tableau 16).

Paramètres Essentiels	Pièces	Calottes supérieures			Calottes inférieures		
	Contrats	FA3	UA	UK	FA3	UA	UK

Tableau 16 : Récapitulatif des paramètres essentiels de fabrication des calottes supérieures et inférieures FA3, UA et UK

Similitude des calottes en termes de ségrégation

A lingot identique, l'étendue des zones ségréguées dans l'épaisseur des calottes dépend de la gamme de forgeage et de la gamme d'usinage.

¹¹ Le traitement thermique de qualité a pour objectif de conduire aux caractéristiques mécaniques requises pour le matériau (limite d'élasticité, limite à rupture, allongement, résilience, ténacité). La trempe s'effectue en trois temps : un chauffage puis un maintien à une température légèrement supérieure 850°C pendant plusieurs heures afin de former de l'austénite à grains fins (opération d'austénisation) et enfin un refroidissement rapide à l'eau. Le revenu a pour objectif d'obtenir un état d'équilibre du matériau et d'éliminer les contraintes internes d'origine thermique ou métallurgique. Il comprend un chauffage, un maintien en température autour de 650°C pendant plusieurs heures et un refroidissement à l'air ou au four.

Les calottes inférieures ont la même gamme de fabrication, du lingot jusqu'à l'ébauchage pour le traitement thermique de qualité, que les calottes supérieures. Par ailleurs, les calottes supérieures présentent, selon AREVA, « une épaisseur supérieure à celle des calottes inférieures lors de la mise en œuvre du TTO, ce qui permet d'une part d'assurer l'enveloppe des propriétés des deux types de pièces et d'autre part de permettre le prélèvement d'un plus grand nombre d'éprouvettes dans l'épaisseur de la pièce ».

Les mesures réalisées sur les calottes supérieures UK, UA, FA3 montrent que le niveau de ségrégation du carbone en surface est comparable sur les trois calottes supérieures, comme indiqué sur la Figure 12 et dans le Tableau 17.

Il est à noter que des valeurs de 0,30 % et 0,29 % de carbone ont été mesurées par prélèvement de copeaux en tête (peau et quart-épaisseur) de la carotte prélevée au centre de la calotte supérieure UA.

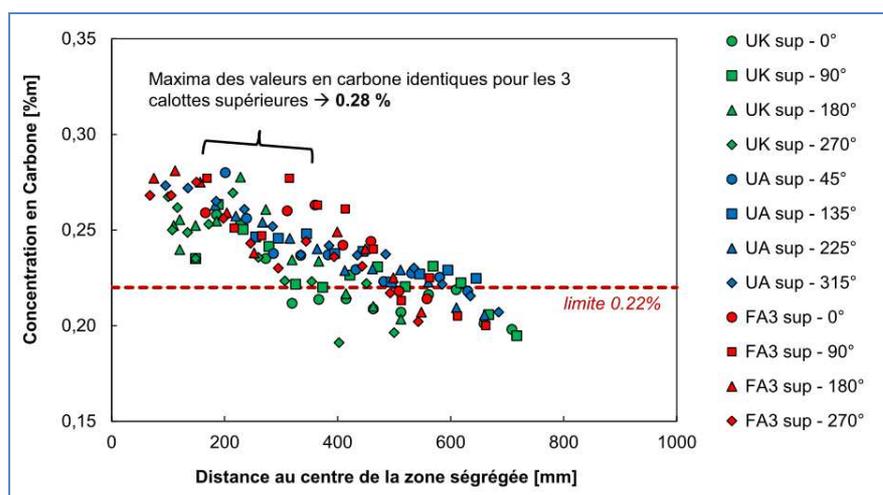


Figure 12 : Évolution de la teneur en carbone sur 4 axes géométriques des calottes supérieures

Calotte supérieure		FA3	UA	UK	Calotte inférieure		FA3	UA	UK
%C maximale mesurée	Surface externe	0,28	0,28	0,28	%C maximale mesurée	Surface externe	0,28	0,27	0,25
	Surface interne	0,17	0,19	0,19		Surface interne	0,16	0,18	0,18

Tableau 17 : Teneur en carbone en surface des calottes FA3, UK et UA mesurée par spectrométrie d'émission optique induite par étincelage pour les surfaces externes et par fusion de copeaux prélevés en cours de fabrication pour les surfaces internes.

4.3.1.2. Actions déjà réalisées par AREVA

La première étape du programme d'essais, déjà réalisée, a consisté à déterminer l'étendue de la zone de ségrégation positive en surface et dans l'épaisseur de la calotte sacrificielle supérieure UK par dosage du carbone par spectroscopie d'émission optique induite par étincelage.

AREVA a indiqué que cette méthode de mesure donne des résultats équivalents à la méthode d'analyse par fusion de copeaux.

AREVA a tout d'abord déterminé l'étendue en surface en peau extérieure (ce qui correspond au côté tête du lingot) de la ségrégation, tout d'abord selon 8 axes puis selon un quadrillage centré sur le centre de la ségrégation préalablement déterminée. Ensuite, AREVA a découpé la calotte (voir Figure 13) et a effectué des mesures de carbone sur une coupe passant par le centre de la ségrégation (voir Figure 14).

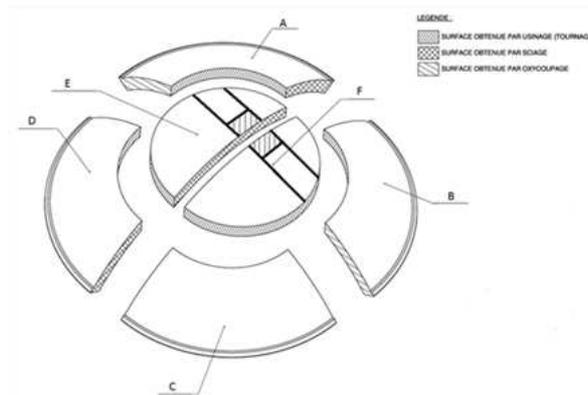


Figure 13 : Schéma de découpe de la calotte supérieure UK

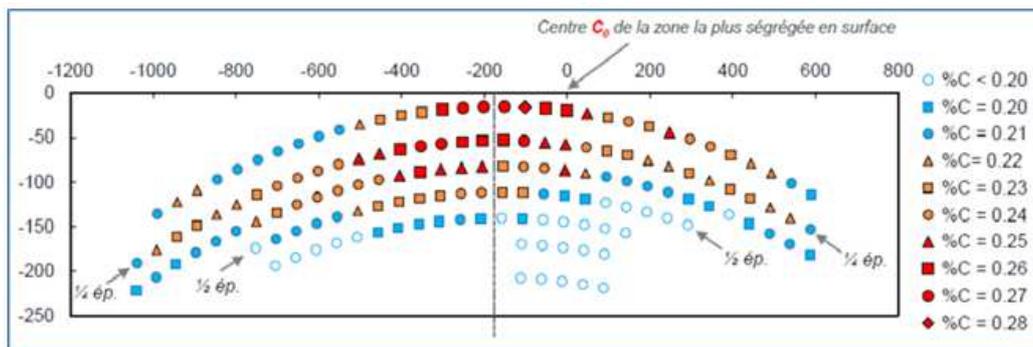


Figure 14 : Cartographie du taux de carbone dans l'épaisseur de la calotte supérieure UK

Ces mesures ont permis à AREVA de caractériser la zone ségrégée de la calotte supérieure :

- la partie ségrégée, c'est-à-dire à concentration de carbone supérieure à 0,22 %, est située jusqu'à la mi-épaisseur (diamètre de 1600 mm au $\frac{1}{4}$ épaisseur et 500 mm à $\frac{1}{2}$ épaisseur) ;
- la partie fortement ségrégée, c'est-à-dire à concentration de carbone supérieure à 0,25 %, s'étend jusqu'à 30 mm sous le $\frac{1}{4}$ épaisseur (diamètre de 550 mm à $\frac{1}{4}$ épaisseur) ;
- la partie non ségrégée, c'est-à-dire à concentration de carbone inférieure strictement à 0,22 %, est située à partir de 30 mm sous la $\frac{1}{2}$ épaisseur.

4.3.1.3. Programme d'essais à venir : caractérisation des propriétés mécaniques de la zone ségrégée

Le programme d'essais dont l'objectif est de déterminer l'impact de la ségrégation majeure positive sur les caractéristiques mécaniques se fera en trois étapes :

1. l'évaluation d'une RT_{NDT} locale : la NDT de la zone de ségrégation majeure positive sera déterminée à partir des éprouvettes Pellini et des éprouvettes de résilience selon le protocole du RCC-M ;
2. l'évaluation de la ténacité dans la zone de ségrégation majeure positive au palier ductile : 5 essais

sur éprouvette CT25 seront réalisés à 50 °C (température d'épreuve) et un essai à 330 °C (température de fonctionnement) ;

3. l'évaluation de la ténacité dans le domaine de la transition fragile-ductile de la ségrégation majeure positive : 48 éprouvettes CT d'épaisseur 12,5 mm seront utilisées. Les essais seront menés conformément à la procédure ASTM E1921.

L'ensemble des essais prévus au quart-épaisseur de la calotte supérieure UK seront réalisés de manière similaire sur des éprouvettes prélevées dans la zone de recette de la calotte supérieure UK et dans celle des calottes FA3 afin de servir de référence.

Suite aux questions du rapporteur, AREVA a révisé son programme d'essais afin d'une part d'optimiser le positionnement des éprouvettes en fonction des concentrations en carbone et d'autre part de réaliser le même programme d'essais à 1/4 et 1/2 épaisseur.

AREVA découpera la zone hachurée (voir Figure 15) en 2 morceaux de 800 x 400 mm qui seront recoupés en deux morceaux de 400 x 400 mm.

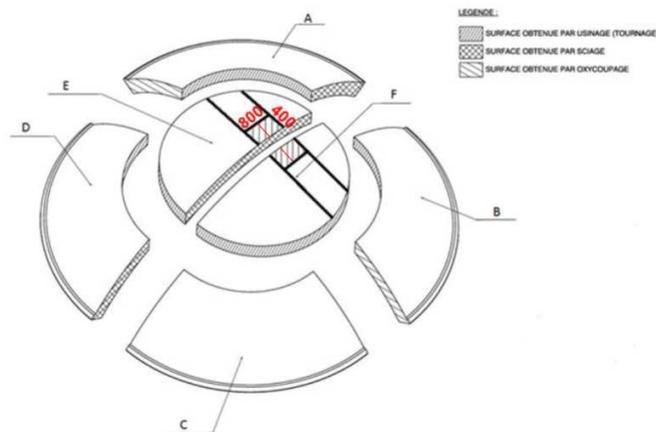


Figure 15 : Positionnement des morceaux de 800 x 400 mm

Chaque morceau de 400 x 400 mm sera tranché selon le plan de la Figure 16. 7 tranches seront ainsi prélevées par une découpe au fil permettant de conserver le maximum de matière.

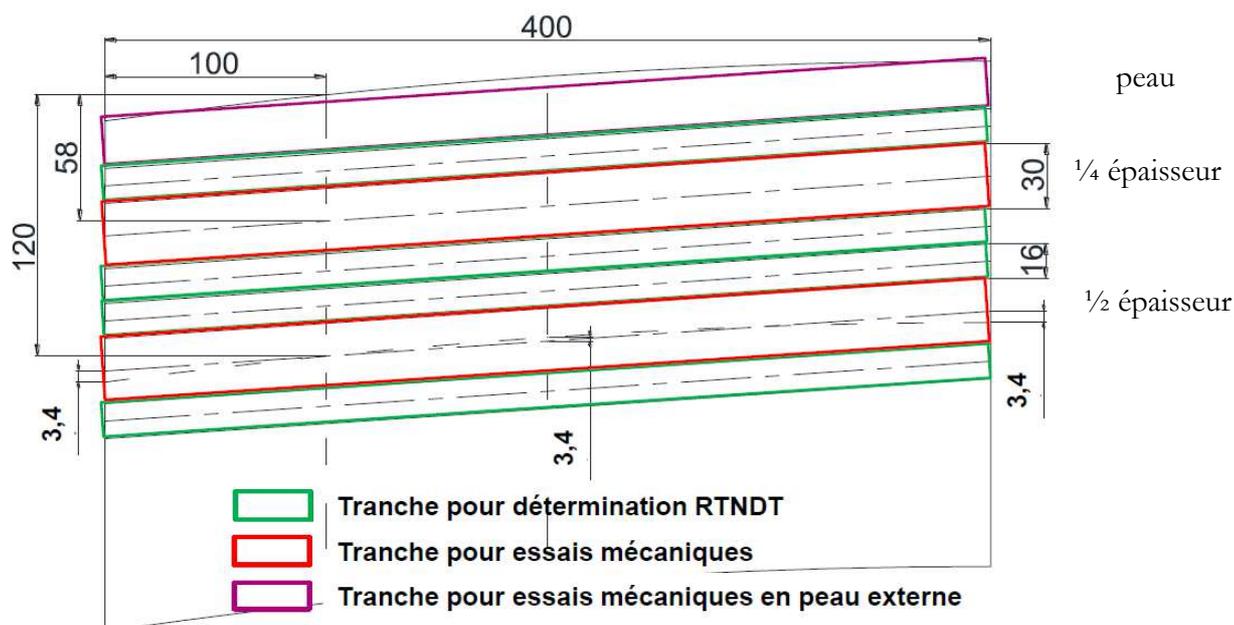


Figure 16 : Découpe des différentes tranches dans l'épaisseur

La tranche supérieure violette permettra la réalisation de 3 essais de traction à 20 °C. Si les allongements à la rupture sont inférieurs à 20 % (valeurs mentionnées au point 4 de l'annexe 1 de l'arrêté en référence [6]), 6 essais de ténacité dans le domaine ductile sont prévus.

Les deux tranches rouges réservées aux essais de ténacité ont une épaisseur de 30 mm et sont centrées en moyenne respectivement à $\frac{1}{4}$ et à $\frac{1}{2}$ épaisseur, avec une variation maximale de 3,4 mm. Le programme comportera à chaque altitude ($\frac{1}{4}$ et $\frac{1}{2}$ épaisseur) :

- 18 éprouvettes de résilience ;
- 48 éprouvettes de type CT12,5 (domaine fragile) ;
- 6 éprouvettes de type CT25 (domaine ductile) ;
- 8 éprouvettes standards de traction.

Ce volume d'essais a été bâti à partir de la caractérisation de la zone ségrégée dans la tranche de la calotte supérieure UK représentée en Figure 14. Il sera optimisé, afin d'assurer le prélèvement d'un maximum d'éprouvettes dans cette zone ségrégée, à partir de la caractérisation chimique par spectrométrie portable selon le plan de la Figure 17 qui sera réalisée sur la surface supérieure de chacune des tranches rouges prévues pour les essais mécaniques. Ainsi, 8 surfaces (2 tranches x 4 blocs) seront caractérisées.

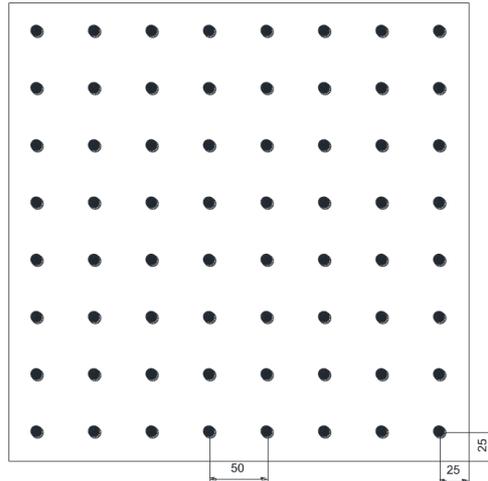


Figure 17 : Cartographie chimique en carbone sur les différentes tranches

De part et d'autre de chaque tranche rouge sont prélevées les tranches vertes pour les essais Pellini :

- 12 éprouvettes de résilience ;
- 8 éprouvettes Pellini.

Analyses chimiques sur éprouvettes

Toutes les éprouvettes prélevées à $\frac{1}{4}$ et $\frac{1}{2}$ épaisseur qui seront rompues feront l'objet d'un prélèvement de copeaux pour réaliser un dosage du carbone et du soufre au plus proche de la zone de rupture. Les prélèvements se feront par perçage (voir Figure 18, Figure 19 et Figure 20).

De plus, sur 5 éprouvettes, une analyse chimique complète sera réalisée afin d'évaluer l'évolution des autres éléments qui ségrégent :

- l'éprouvette dont la teneur en carbone correspond à la valeur minimale des essais de ténacité ;
- l'éprouvette dont la teneur en carbone correspond à la valeur maximale des essais de ténacité ;
- 3 éprouvettes choisies aléatoirement dans cet intervalle.

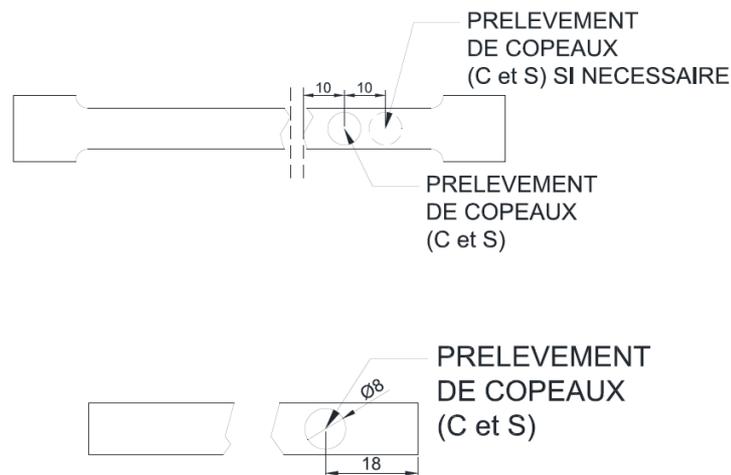


Figure 18 : Prélèvement de copeaux sur éprouvettes de traction et de résilience

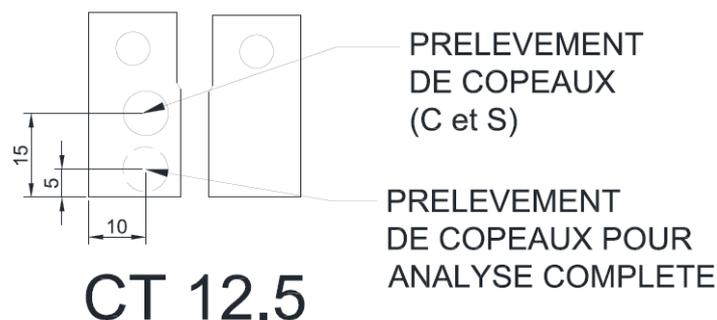


Figure 19 : Prélèvement de copeaux sur éprouvette CT 12,5

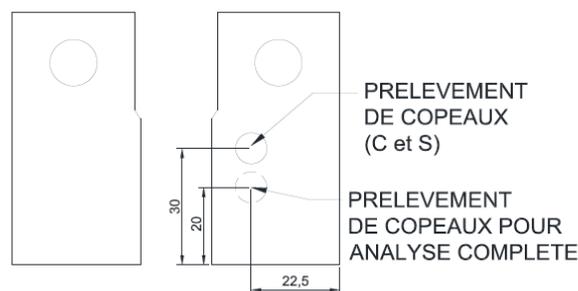


Figure 20 : Prélèvement de copeaux sur éprouvette CT 25

Suite aux mesures de teneur en carbone en surface externe des différentes calottes, Areva retient le seuil de 0,25 % pour définir le volume de matière disponible pour les essais mécaniques.

Macrographies et micrographies

Une macrographie sera réalisée afin de caractériser l'état microstructural de la pièce (attaque Nital 4 %).

En fonction des résultats de cette macrographie et de la matière disponible, des échantillons pour réaliser une micrographie pourront être prélevés.

Ce prélèvement ne se fera que s'il ne remet pas en cause la quantité de matière nécessaire à la réalisation des essais mécaniques.

4.3.1.4. Laboratoires d'essais

AREVA a utilisé les critères suivants pour choisir le laboratoire d'essais, par ordre d'importance :

1. savoir-faire technique. Peu de laboratoires détiennent les capacités techniques pour réaliser le programme d'essais complet ;
2. accréditation selon la norme ISO 17025 ;
3. capacité du laboratoire à réaliser l'usinage et les essais ;
4. délai de réalisation.

Ainsi, AREVA retient les laboratoires présentés dans le Tableau 18.

Essais	Norme applicable (RCC-M) au projet FA3	Dernière norme en vigueur	Laboratoire de réalisation
Essais de traction	NF EN 10002-1 et 10002-5	ISO 6892-1 et 6892-2	AREVA Erlangen
Essais de résilience	NF EN 10045-1	ISO 148-1	AREVA Erlangen
Essais Pellini	ASTM E208	ASTM E208	AREVA Saint-Marcel
Essais de ténacité (ductile et fragile)	N/A	ASTM E1820 et 1921	AREVA Erlangen
Chimie	MC 1350	-	AREVA Saint-Marcel et Creusot Forge

Tableau 18 : Normes applicables et laboratoires d'essais retenus

Les normes utilisées par le laboratoire d'Erlangen pour les essais mécaniques, en particulier de traction et de résilience, sont les dernières normes en vigueur. Elles sont également appelées dans le §A1300 du modificatif 2010 de l'édition 2007 du RCC-M.

Le laboratoire d'Erlangen qui réalisera les essais de traction, de résilience et de ténacité est accrédité ISO 17025 selon les dernières normes en vigueur.

Pour les essais Pellini, qui sont des essais industriels peu pratiqués par les laboratoires de recherche, AREVA a choisi le laboratoire de Saint-Marcel qui n'est pas accrédité. AREVA fera surveiller la réalisation de ces essais par un organisme agréé.

Pour les analyses chimiques, les prélèvements de copeaux seront réalisés par l'usine de Saint-Marcel qui pratique régulièrement ces prélèvements dont l'enjeu est d'éviter la pollution des copeaux. Les analyses chimiques seront réalisées par le laboratoire de Creusot Forge.

Incertitudes de mesure

Les incertitudes de mesures sont quantifiées pour les essais de traction, de ténacité et de résilience étant donné qu'ils sont réalisés dans un laboratoire accrédité ISO 17025.

Pour les essais Pellini, les procédures mises en œuvre doivent permettre de justifier la bonne maîtrise de l'essai.

Pour les analyses chimiques, le laboratoire de Creusot Forge n'est pas accrédité et ne dispose pas d'évaluation des incertitudes de mesure.

4.3.2. Position du rapporteur

Représentativité de la calotte supérieure UK

Le rapporteur considère que la calotte supérieure UK est représentative de la calotte supérieure FA3 tant du point de vue de la teneur en carbone que de l'étendue de la zone ségréguée, au vu de leur composition chimique, de leur gamme de fabrication et des niveaux de carbone relevés en surface des calottes.

Le rapporteur note que, malgré un usinage plus important en peau externe sur les calottes inférieures,

les valeurs maximales de concentration en carbone en peau externe des calottes inférieures et supérieures sont similaires. Ces valeurs ne peuvent pas être expliquées par de simples considérations géométriques (épaisseur d'usinage, épaisseur de la calotte inférieure...) et ne permettent donc pas d'apprécier la profondeur de la zone ségréguée de la calotte inférieure, notamment au regard de la 1/2 épaisseur de cette calotte. De ce fait, le rapporteur considère que des investigations complémentaires sont nécessaires concernant l'étendue et la profondeur de la zone ségréguée dans une calotte inférieure.

De plus, le rapporteur considère que le programme de caractérisation des propriétés mécaniques ne peut se borner à déterminer les propriétés d'un matériau issu d'une seule coulée. Ainsi, des mesures de propriétés mécaniques sur une calotte provenant d'une coulée différente de la calotte supérieure UK sont nécessaires afin d'améliorer la confiance dans les résultats qui pourront être obtenus.

A la fin de l'instruction, AREVA s'est en conséquence engagé à réaliser une caractérisation chimique et un programme d'essais mécaniques sur la calotte inférieure UA identiques à ceux qui seront réalisés sur la calotte supérieure UK. AREVA indique toutefois que, les calottes inférieures étant moins épaisses que les calottes supérieures, certains essais ne pourront pas être réalisés. Ainsi, AREVA propose de ne pas réaliser les essais Pellini et de déterminer la RT_{NDT} locale à 1/4 et 1/2 épaisseur de la calotte inférieure UA par une autre méthode :

- si les résultats obtenus sur la calotte supérieure UK confirment que, dans la zone ségréguée, la RT_{NDT} est fixée par la température TCV du chapitre MC1240 du code RCC-M, AREVA propose d'utiliser cette température pour déterminer la RT_{NDT} locale ;
- si la RT_{NDT} n'est pas fixée par la température TCV du chapitre MC1240 du code RCC-M, AREVA propose, en fonction de la cartographie carbone qui sera réalisée sur les tranches, d'étudier la possibilité d'usiner quelques éprouvettes Pellini ;
- s'il n'est pas possible d'usiner ces éprouvettes Pellini, AREVA propose d'estimer le décalage entre la RT_{NDT} de recette et la NDT de la zone macro-ségréguée sur la calotte supérieure UK et de transposer ce décalage à la RT_{NDT} de la zone de recette de la calotte UA. AREVA propose de réaliser également des essais de résilience selon la démarche du chapitre MC1240 du code RCC-M pour finaliser l'estimation de la RT_{NDT} locale.

Le rapporteur considère que cet engagement est satisfaisant.

Traitement thermique

Les calottes FA3 et UK ont subi le même traitement thermique de qualité (TTQ). Les calottes FA3 ont en outre subi les différents traitements thermiques de détensionnement (TTD) consécutifs aux opérations de soudage. Ces traitements thermiques ont une influence sur les propriétés mécaniques de l'acier 16MND5 et en particulier sur sa ténacité, comme le montrent les valeurs de résilience mesurées sur des éprouvettes prélevées après TTQ et après TTQ et TTD. Dans la mesure où l'objectif d'AREVA est de déterminer les propriétés du matériau de la cuve de l'EPR de Flamanville 3 dans le cadre de son exploitation, le même traitement thermique que celui subi par cette cuve doit nécessairement être appliqué aux éprouvettes prélevées sur les calottes sacrificielles.

A la fin de l'instruction, AREVA s'est engagé à réaliser, sur les blocs de 800 x 400 mm, un traitement thermique de détensionnement tel que requis dans la spécification d'approvisionnement, à savoir un maintien à 620 °C +/- 5 °C pendant 16h à 16h30 avec un gradient de montée et de descente de 55 °C/h maximum entre 400 °C et le palier de 620 °C.

Le rapporteur considère que cet engagement est satisfaisant.

Suffisance du nombre d'essais

Un nombre important d'essais de ténacité est prévu par AREVA sur des éprouvettes prélevées au quart et à mi-épaisseur dans la zone la plus ségréguée de la calotte supérieure UK.

Pour le rapporteur, le volume d'essais apparaît suffisant mais il a été souligné lors de l'instruction que compte tenu de la variabilité de la concentration en carbone dans la zone de prélèvement, l'échantillon pour une gamme de concentration en carbone donnée pourrait être faible. De ce fait, la suffisance du programme d'essais ne pourra être appréciée qu'*a posteriori*, après le dépouillement et l'interprétation des résultats d'essais. Le rapporteur considère que le maximum de vérifications doit être réalisé pour caractériser la zone ségréguée qui est sans équivalent sur le parc d'EDF car il n'est pas aisé *a priori* de prédire l'influence de l'ensemble des paramètres sur la ténacité. Par ailleurs, le rapporteur considère que l'ensemble de la matière (éprouvettes, chutes ...) issue des calottes supérieures UA, UK et inférieure UA devra être identifié et conservé pour d'éventuelles investigations complémentaires.

Le rapporteur souligne que la sélection des situations limitatives et des chargements sollicitants a été menée en supposant que la baisse de ténacité due à la zone ségréguée s'arrêtait à la mi-épaisseur. Le rapporteur note que le programme d'essais prévoit maintenant des essais à 1/2 épaisseur, ce qui est de nature à valider cette hypothèse essentielle du dossier d'AREVA. Le rapporteur souligne cependant que les résultats présentés sur la Figure 14 montrent que la zone de ségrégation dépasse la 1/2 épaisseur.

Positionnement des éprouvettes

Le rapporteur note que le positionnement des éprouvettes dans les 28 tranches (7 tranches par morceau) sera élaboré en tenant compte du résultat de la cartographie chimique par spectrométrie en surface des 8 tranches destinées aux essais mécaniques (traction, résilience et ténacité).

Le rapporteur considère que cette disposition est de nature à intercepter les zones présentant la teneur en carbone la plus élevée.

Interprétation des résultats d'essais

Le rapporteur considère que les analyses chimiques en carbone et soufre prévues sur chaque éprouvette rompue au plus près de la zone de rupture permettront de s'assurer que le programme d'essais caractérise la zone ségréguée.

Le rapporteur considère que les macrographies et micrographies devront permettre de caractériser la structure du matériau ségrégué et qu'une analyse des faciès de rupture des éprouvettes doit être réalisée.

Recommandation 2

Le rapporteur recommande qu'AREVA précise, avant l'engagement du programme d'essais et après la caractérisation de l'étendue de la zone ségréguée, la localisation des macrographies et micrographies. Le rapporteur recommande également qu'AREVA analyse les faciès de rupture des éprouvettes.

Le rapporteur considère que toutes les données issues du programme d'essais doivent être analysées après leur classement en fonction du niveau de ségrégation des éprouvettes d'où elles sont issues. Toutefois, le rapporteur considère que seuls les résultats des essais correspondant à des éprouvettes avec une concentration en carbone supérieure ou égale à 0,25 % doivent être retenus quand un traitement statistique des résultats d'essais est mis en œuvre.

Le rapporteur note que l'ensemble de la démarche repose sur l'hypothèse que les résiliences faibles sont liées à la présence de ségrégations majeures positives, et que les différentes calottes sont représentatives vis-à-vis de ce phénomène, ce qui devra être confirmé par les résultats d'essais. Si les résultats d'essais mettent en évidence que les propriétés mécaniques sont dégradées par un autre phénomène, le rapporteur considère qu'AREVA devra montrer la représentativité des calottes UK, UA et FA3 au regard du nouveau phénomène constaté.

Allongement en peau

Le rapporteur rappelle que dans le cadre du dossier de qualification technique des dômes elliptiques de générateurs de vapeur de remplacement de réacteurs de 900 MWe, il a été montré que les essais réalisés en peau dans des zones ségréguées peuvent présenter des valeurs d'allongement inférieures à la valeur de 20 % mentionnée au point 4 de l'annexe 1 de l'arrêté en référence [6] (voir Tableau 19).

repère	localisation	Rp 0,2%	Rm	A%	C %
8T3	zone ségréguée dans le renfort	506	653	24,4	0,23
8T1	Zone du limiteur de débit	577	736	20,3	0,26
T23	Tête de la carotte centrale	574	732	18,4	0,25

Tableau 19 : Résultats obtenus sur les dômes elliptiques sacrificiels de générateurs de vapeur de remplacement de réacteurs de 900 MWe

Le rapporteur note que trois essais de traction seront réalisés en peau extérieure de la calotte supérieure UK. Le rapporteur note qu'en cas d'allongement ne respectant pas la valeur de l'arrêté en référence [6] (supérieur ou égal à 20 %), AREVA prévoit de réaliser 6 essais de ténacité dans le domaine ductile.

Le rapporteur considère qu'en cas d'allongements en peau inférieurs à la valeur mentionnée au point 4 de l'annexe 1 à l'arrêté [6], AREVA devra justifier de manière détaillée, en tenant compte notamment des propriétés mécaniques mesurées dans les zones ségréguées des calottes supérieure UK et inférieure UA, que le matériau présente un comportement ductile compatible avec les règles de conception utilisées pour les calottes de la cuve de l'EPR de Flamanville 3.

Choix du laboratoire

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

Le rapporteur prend note qu'une quantification des incertitudes sur les résultats des essais réalisés dans

ce laboratoire accrédité (essais mécaniques à l'exception des essais Pellini) sera transmise par AREVA. Il considère qu'elles devront être suffisamment faibles pour pouvoir les considérer comme couvertes par des facteurs de sécurité appropriés.

Le rapporteur considère que la spécificité technique des essais Pellini justifie leur réalisation dans un laboratoire expérimenté dans ce type d'essais.

Le rapporteur considère que les analyses chimiques, qui ne seront pas réalisés par un laboratoire accrédité, ne présentent pas d'enjeu majeur hormis la garantie de la traçabilité des copeaux prélevés. A ce titre, le rapporteur considère que les analyses déjà réalisées par le laboratoire de Creusot Forge dans le cadre de dossiers similaires par le passé ont pu démontrer cette maîtrise. Cependant, le rapporteur considère que ces analyses chimiques doivent faire l'objet d'une évaluation des incertitudes de mesure.

Compte tenu de l'absence d'accréditation des laboratoires retenus pour les analyses chimiques et les essais Pellini, le rapporteur considère également que ces analyses chimiques ainsi que les essais Pellini doivent faire l'objet d'une surveillance spécifique par un organisme habilité afin d'apporter des garanties techniques et d'impartialité quant au respect des procédures d'essais, à la traçabilité et à l'interprétation des résultats.

A la fin de l'instruction, AREVA s'est engagé à rédiger un protocole spécifique d'évaluation des incertitudes associées aux analyses chimiques. De plus, AREVA s'est engagé à réaliser l'ensemble des essais (préparation des éprouvettes, prélèvements et essais) sous la surveillance à 100 % d'un organisme habilité mandaté par l'ASN.

Le rapporteur considère que cet engagement est satisfaisant. Cependant, le rapporteur souligne qu'un laboratoire indépendant du groupe AREVA et accrédité apporterait des garanties supérieures en matière d'impartialité.

Normes d'essais appliquées

Le rapporteur note que les normes qui seront utilisées pour les essais ne sont pas celles applicables au projet FA3. Ce changement de normes peut avoir un impact sur les résultats, les conditions d'invalidation et l'interprétation des essais. AREVA a réalisé une première analyse partielle qui montre que, sur la norme de traction, l'évolution n'aurait pas d'impact.

A la fin de l'instruction, AREVA s'est engagé à réaliser une analyse d'impact complète de l'évolution des normes sur les résultats d'essais.

Le rapporteur considère que cet engagement est satisfaisant. Le rapporteur considère toutefois que cette analyse devra être réalisée avant que les essais ne soient réalisés et qu'elle devra notamment traiter les critères relatifs aux essais non conformes.

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

4.4.1. Proposition d'AREVA

AREVA distingue :

- les situations de fonctionnement normales, incidentelles et accidentelles, qui sont analysées dans la démonstration de sûreté ;
- les épreuves hydrauliques qui sont analysées vis-à-vis de la sécurité puisque le cœur est déchargé

pendant les épreuves.

Pour les situations de fonctionnement normales, incidentelles et accidentelles, AREVA a sélectionné les situations limitatives et les chargements sollicitants en supposant que la baisse de ténacité due à la zone ségréguée s'arrêtait à la mi-épaisseur. De ce fait, AREVA a prévu des essais de résilience à mi-épaisseur pour vérifier cette hypothèse.

Pour les épreuves hydrauliques, AREVA propose de positionner les valeurs de ténacité mesurées dans la zone ségréguée, issues des résultats du programme d'essais, au regard de la courbe ZG 6110 du RCC-M (cf. Figure 8), indexée soit sur :

1. la RT_{NDT} de recette de la calotte testée ;
2. la RT_{NDT} locale déterminée par le programme d'essais ;
3. la RT_{T0} (approche master curve – voir Annexe 5) déterminée par le programme d'essais.

Le logigramme de la Figure 21 synthétise l'enchaînement des tests retenus dans la démarche proposée par AREVA.

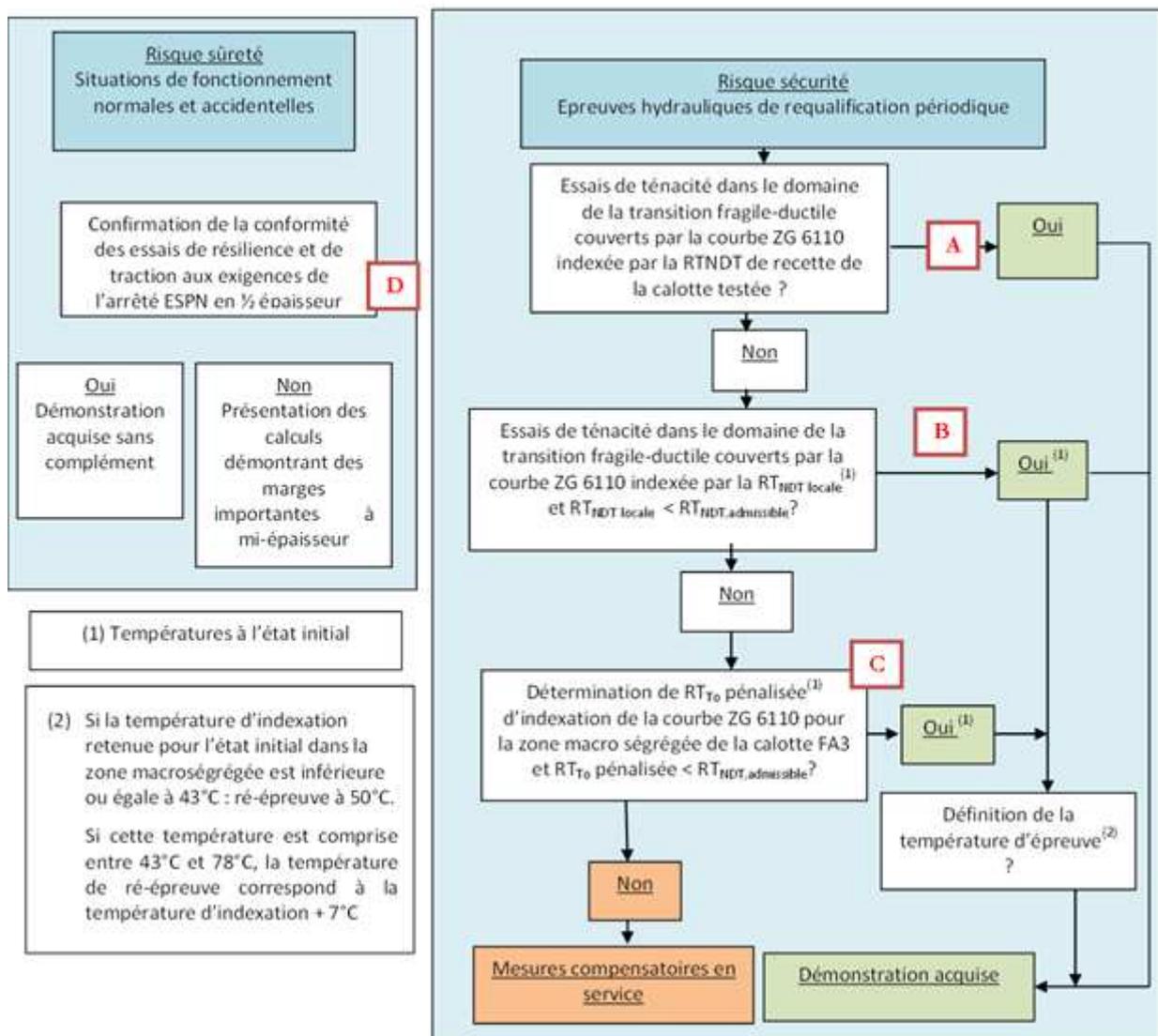


Figure 21 : Démarche détaillée de justification - Enchaînement des tests

Dans le cas (repéré **A** sur le logigramme de la Figure 21) pour lequel les valeurs de ténacité mesurées dans la zone ségréguée sont bornées (par valeur inférieure) par la courbe ZG6110 du RCC-M indexée sur la RT_{NDT} de recette (test repéré A sur le logigramme), le dossier de conception reste applicable.

Si le test **A** n'est pas validé, dans le cas (repéré **B** sur le logigramme) où les valeurs de ténacité mesurées dans la zone ségréguée sont bornées (par valeur inférieure) par la courbe ZG6110 du RCC-M indexée sur la RT_{NDT} locale et où il est aussi vérifié que la RT_{NDT} locale est inférieure à la RT_{NDT} admissible (qui dépend de la température d'épreuve comme indiqué dans le Tableau 12 du § 4.2.3.4), la ténacité du matériau déterminée par le programme d'essais est supérieure à la ténacité suffisante. Dans ce cas, la démonstration est acquise avec potentiellement une redéfinition de la température d'épreuve.

Dans le cas où le test **B** n'est pas validé (repéré **C** sur le logigramme), les valeurs de ténacité mesurées dans la zone ségréguée sont bornées (par valeur inférieure) par la courbe ZG6110 du RCC-M sur la RT_{T0} ¹² et un test est réalisé pour vérifier que la RT_{T0} est inférieure à la RT_{NDT} admissible (qui dépend de la température d'épreuve comme indiqué dans le Tableau 12 du § 4.2.3.4). Dans ce cas, la ténacité du matériau déterminée par le programme d'essais est supérieure à la ténacité suffisante. Ce test **C** est proposé par AREVA dans le cas où la courbe indexée sur la RT_{NDT} locale s'avérerait trop conservatrice et conduirait à une température d'épreuve trop élevée (décalage de RT_{NDT} trop important). Dans le cas contraire, AREVA prévoit des mesures compensatoires en service visant à démontrer l'absence de défauts nocifs.

4.4.2. Position du rapporteur

Pour ce qui concerne les situations analysées pour la sûreté, le rapporteur souligne que la sélection des chargements sollicitants a été faite par AREVA en supposant que la baisse de ténacité due à la zone ségréguée s'arrêterait à la mi-épaisseur et qu'il n'était en conséquence pas nécessaire d'étudier les situations de chocs froids. Cette hypothèse implique qu'à partir de la mi-épaisseur, la ténacité est similaire à celle de la zone de recette (respect du critère de résilience) et qu'ainsi, pour des défauts situés dans la partie interne, le dossier initial de conception est applicable.

Le rapporteur note que le programme d'essais prévoit des essais à mi-épaisseur, ce qui est de nature à valider cette hypothèse essentielle du dossier d'AREVA. En revanche, AREVA retient pour critère des essais de résilience, la valeur de résilience mentionnée dans l'arrêté en référence [6], soit 60 J à 0 °C. Le rapporteur considère que ceci n'est pas approprié puisqu'AREVA, pour démontrer que le dossier de conception reste applicable, doit utiliser comme critères ceux retenus dans le dossier de conception, qui est fondé sur l'application du code RCC-M (approvisionnement selon les spécifications de ce code). Il est donc nécessaire de retenir les mêmes critères d'acceptabilité à mi-épaisseur que ceux en zone de recette, soit en particulier une résilience de 80 J en valeur moyenne.

À la fin de l'instruction, AREVA a précisé qu'il n'était pas nécessaire de respecter, à mi-épaisseur, les critères définis dans la zone de recette pour s'assurer de l'applicabilité des hypothèses de conception à mi-épaisseur. Le rapporteur considère que cette position consiste à définir la qualité attendue à mi-épaisseur avec une résilience de 60 J en valeur moyenne, ce qui est jugée acceptable.

¹² La température RT_{T0} est la température de référence de la zone ségréguée selon la norme ASTM E1921 majorée de $19,4 + 20^\circ\text{C}$ soit $39,4^\circ\text{C}$ afin de couvrir l'ensemble des points expérimentaux de la courbe de ténacité de référence du RCC-M.

En fin d’instruction, AREVA a par ailleurs indiqué que dans le cas où la résilience à mi-épaisseur n’est pas respectée (repéré **D** sur le logigramme), le programme d’essais prévu à mi-épaisseur permettrait de démontrer, de manière analogue à la démarche proposée pour les épreuves hydrauliques, que la ténacité est suffisante.

Le rapporteur souligne que ceci remet en cause la détermination de la ténacité suffisante proposée par AREVA (paragraphe 4.2) et donc la démarche de justification associée.

Pour ce qui concerne les situations d’épreuve hydraulique, AREVA considère que le dossier de conception permet d’écarter le risque de rupture brutale si le test **A** est satisfait. Le rapporteur souligne que le test **A** est satisfait selon AREVA dès lors que les mesures de ténacité obtenues se positionnent toutes au-dessus de la courbe ZG 6110 indexée sur la valeur de RT_{NDT} de recette de la calotte testée.

Le rapporteur considère que ce test permet en effet de vérifier de manière satisfaisante que la courbe ZG 6110 indexée sur la valeur de RT_{NDT} de recette de la calotte testée est enveloppe des mesures de ténacité réalisées dans la zone de ségrégation majeure positive. Toutefois, cela ne permet pas d’estimer les marges mécaniques de manière conservatrice. En effet, AREVA a estimé a priori que la RT_{NDT} locale de la zone ségréguée serait supérieure à la RT_{NDT} de recette (décalage entre 35 et 70 °C). Le rapporteur souligne que le critère utilisé dans les analyses de rupture brutale (facteur d’intensité de contraintes inférieur à la ténacité donnée par la courbe ZG indexée) associé à la RT_{NDT} de recette est moins conservatif que celui qui serait associé à la RT_{NDT} locale (Figure 22).

En conséquence, le test **A** n’est acceptable que s’il est complété par la vérification des marges par rapport au risque de rupture brutale en considérant la courbe de l’annexe ZG indexée sur la RT_{NDT} locale et non sur la RT_{NDT} de recette.

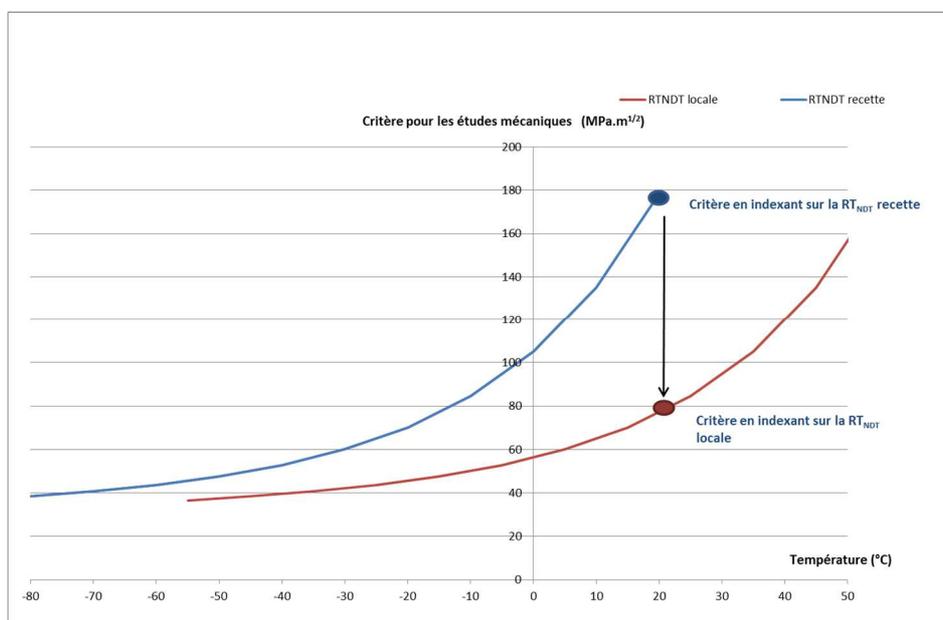
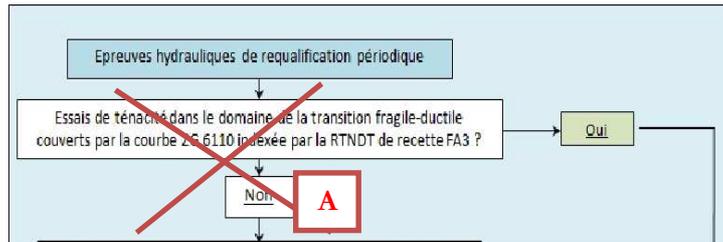


Figure 22 : Diminution de K_{IC} selon l’indexation de la courbe de l’annexe ZG 6110.



Pour ce qui concerne le test **B** proposé par AREVA, le rapporteur n'a pas de remarque particulière. En effet, il s'agit d'une adaptation à la zone ségréguée de la démarche de justification de la tenue en service à la rupture brutale des viroles de cuve irradiées. Le ΔRT_{NDT} dû à l'irradiation est simplement remplacé par un ΔRT_{NDT} dû à la zone ségréguée. Il est donc jugé acceptable par le rapporteur.

Pour ce qui concerne le test **C** proposé par AREVA, le rapporteur souligne qu'AREVA propose une nouvelle approche (approche de type Master-curve) qui revient à utiliser des méthodes non approuvées, dans le cadre d'un dossier spécifique et après l'échec de la démarche habituelle. Le rapporteur estime qu'un dossier de non-conformité matériau n'est pas le bon cadre pour instruire de nouvelles méthodes de justification. Par ailleurs, le rapporteur souligne que le fait de recourir à cette nouvelle approche découlerait d'un dépassement notable, en zone ségréguée, de la RT_{NDT} de conception retenue pour les viroles de la zone de cœur en fin de vie (30 °C). Cette nouvelle approche peut apporter un éclairage supplémentaire par l'interprétation des données qu'elle propose, mais ne peut constituer en soi le support de la démonstration d'une ténacité suffisante.

Le rapporteur souligne enfin qu'AREVA n'a défini, ni dans son dossier ni lors de l'instruction, les mesures compensatoires en service visant à démontrer l'absence de défauts nocifs.

Recommandation 3

Le rapporteur recommande que la démarche de justification d'AREVA repose sur :

- la vérification que la courbe ZG 6110 du RCC-M indexée sur la RT_{NDT} mesurée dans la zone ségréguée constitue bien l'enveloppe inférieure des mesures de ténacité réalisées sur le matériau dans la zone ségréguée ;
- la prise en compte de la RT_{NDT} mesurée dans la zone ségréguée pour la comparer à la RT_{NDT} admissible, représentative de la ténacité suffisante du matériau.

Recommandation 4

Le rapporteur recommande de limiter l'utilisation de l'approche de type Master-curve, proposée par AREVA pour l'indexation de la courbe ZG 6110 du RCC-M, à une interprétation complémentaire des résultats des essais mécaniques.

Le rapporteur note que la démarche proposée par AREVA peut conduire à ajuster la température d'épreuve, selon la logique suivante :

- si la RT_{NDT} locale dans la zone ségréguée est inférieure ou égale à 43 °C, AREVA retient une température d'épreuve à 50 °C ;
- si la RT_{NDT} locale dans la zone ségréguée est comprise entre 43 et 78 °C¹³, AREVA retient une température d'épreuve à température ajustée à RT_{NDT} locale + 7 °C.

¹³ Un maximum de 85°C est fixé pour la réalisation des épreuves.

Le rapporteur n'a pas d'observation particulière sur la définition de la température d'épreuve en fonction de la RT_{NDT} locale mesurée.

4.5. Conséquences de la démarche de justification sur la déclinaison du principe de défense en profondeur

La démarche de justification qu'AREVA propose est une analyse du comportement mécanique à la rupture des calottes du fond et du couvercle de la cuve de Flamanville 3, fondée sur des essais menés sur une pièce sacrificielle représentative. Cette démarche pourrait mettre en évidence, le cas échéant, des marges significatives par rapport aux risques redoutés, qui permettraient alors de conclure que le procédé de fabrication confère des propriétés mécaniques au matériau d'un niveau suffisant pour prévenir ces risques. Toutefois, cela ne permettra pas d'apporter la garantie de haute qualité de fabrication, qu'apportent l'utilisation de la meilleure technique disponible et une qualification technique satisfaisante, attendue pour un composant en exclusion de rupture tel que la cuve.

En effet, retenir l'hypothèse d'exclusion de la rupture de la cuve à la conception conduit à ce que sa défaillance ne soit pas postulée dans la démonstration de sûreté. Ainsi, aucune disposition n'est prévue au titre du troisième niveau de la défense en profondeur pour limiter les conséquences de sa défaillance. De ce fait, cette hypothèse nécessite de renforcer les deux premiers niveaux de la défense en profondeur pour atteindre un niveau de sûreté satisfaisant.

Aussi, dans la mesure où le premier niveau de défense en profondeur est affecté, le rapporteur considère que la démarche de justification proposée par AREVA nécessite d'être complétée par des dispositions opérationnelles sur les calottes du fond et du couvercle de la cuve de Flamanville 3 permettant de renforcer le deuxième niveau de défense en profondeur. Ces dispositions opérationnelles devront comprendre des contrôles renforcés de l'absence de défaut à l'issue de la fabrication ainsi que des contrôles périodiques au cours de l'exploitation.

Recommandation 5

Compte tenu des constatations affectant le premier niveau de défense en profondeur, le rapporteur considère qu'une démarche de justification sans dispositions visant à renforcer le deuxième niveau de défense en profondeur ne saurait être suffisante pour justifier l'usage nucléaire des calottes de la cuve de Flamanville 3.

A ce titre, le rapporteur recommande que des dispositions renforcées de contrôle de mise en service, de suivi en service, d'entretien et d'exploitation soient définies et mises en œuvre.

5. Conclusion générale

AREVA a informé, fin 2014, l'ASN de résultats d'essais de résilience, réalisés dans le cadre de la qualification technique des opérations de fabrication des calottes de la cuve de l'EPR de Flamanville, plus faibles qu'attendus. Les valeurs mesurées sur deux séries de trois éprouvettes, prélevées sur une calotte représentative de celles destinées à Flamanville 3, présentent une valeur moyenne de 52 joules ne permettant pas d'atteindre la qualité attendue par AREVA et est également inférieure à la valeur de résilience de 60 joules mentionnée au point 4 de l'annexe 1 de l'arrêté du 12 décembre 2005 relatif aux équipements sous pression nucléaires en référence [6], dit « arrêté ESPN ». Le non-respect des critères de résilience ne permet donc pas de justifier la suffisance de la ténacité du matériau.

AREVA a réalisé des investigations pour déterminer l'origine de ces valeurs non conformes. Les mesures de carbone réalisées en surface de la calotte par spectrométrie portative ont montré la présence d'une zone de ségrégation majeure positive sur un diamètre d'environ un mètre. Par ailleurs, les examens métallographiques des éprouvettes montrent la présence de ces ségrégations à quart épaisseur. AREVA attribue les faibles valeurs de résilience à la présence de cette zone issue du lingot utilisé pour le forgeage et non totalement éliminée lors des opérations de chutage.

Compte tenu de cet écart, AREVA a proposé la réalisation d'un programme d'essais sur une pièce sacrificielle, représentative des calottes inférieure et supérieure du réacteur EPR de Flamanville, afin de justifier du caractère suffisamment tenace du matériau de ces calottes.

Exigences réglementaires applicables à la conception et à la fabrication de la cuve de l'EPR de Flamanville 3

La conception des installations nucléaires repose sur le principe de défense en profondeur, qui conduit à la mise en œuvre de niveaux de défense successifs (caractéristiques intrinsèques, dispositions matérielles et procédures), destinés à prévenir les incidents et accidents puis, en cas d'échec de la prévention, à en limiter les conséquences. L'application du principe de défense en profondeur est demandée par l'article 3.1 de l'arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base.

Le *premier niveau de défense* a pour objet de prévenir les incidents : pour les équipements, des dispositions sont définies pour assurer un haut niveau de qualité de leur conception et de leur fabrication. En particulier, l'exigence d'utilisation des meilleures techniques disponibles citée à l'annexe 1 du décret du 13 décembre 1999 relatif aux équipements sous pression, contribue au premier niveau de défense en profondeur. Par ailleurs, afin d'assurer un haut niveau de qualité, des exigences spécifiques sont définies pour les caractéristiques des matériaux afin de garantir que le matériau est suffisamment ductile et tenace. Enfin, l'élaboration d'un matériau qui présente un risque d'hétérogénéité de ses caractéristiques doit faire l'objet d'une qualification technique ayant pour objet d'assurer que les composants fabriqués dans les conditions et selon les modalités de la qualification auront les caractéristiques requises.

La rupture de la cuve est exclue au stade de la conception : exclure la rupture d'un composant conduit à ce que sa défaillance ne soit pas postulée dans la démonstration de sûreté. Ainsi, aucune disposition n'est prévue au titre du troisième niveau de la défense en profondeur pour limiter les conséquences de sa défaillance. De ce fait, l'hypothèse d'exclusion de rupture nécessite de renforcer les deux premiers niveaux de la défense en profondeur pour atteindre un niveau de sûreté satisfaisant.

Le dossier de qualification technique présenté par AREVA pour les calottes du fond et du couvercle de

la cuve de Flamanville 3 montre que le risque d'hétérogénéité dû aux ségrégations résiduelles positives a été mal apprécié et ses conséquences mal quantifiées. Le rapporteur considère que l'exigence de qualification technique n'est ainsi pas respectée pour les calottes de la cuve et du couvercle de cuve destinées à Flamanville 3. Par ailleurs, le rapporteur souligne qu'AREVA n'a pas fait le choix de la meilleure technique disponible pour la réalisation des calottes de la cuve de l'EPR de Flamanville 3.

Le rapporteur considère que le procédé de fabrication retenu pour les calottes de la cuve de l'EPR de Flamanville ne procure pas la même garantie de qualité qu'auraient procurée la meilleure technique disponible et une qualification technique satisfaisante : ces conclusions mettent en cause le premier niveau de défense en profondeur qui vise l'obtention d'un haut niveau de qualité de conception et de fabrication du fait du non-respect des exigences rappelées ci-dessus.

Démarche pour justifier de la ténacité suffisante des calottes de cuve

Compte tenu du non-respect des valeurs minimales de résilience spécifiées par l'arrêté en référence [6] pour un matériau à structure ferritique, AREVA a proposé une démarche visant à justifier du caractère suffisant de la ténacité du matériau des calottes de l'EPR de Flamanville 3. Cette démarche est axée sur l'évaluation du risque de rupture brutale, AREVA considérant que la présence de ségrégations majeures positives ne remet pas en cause l'absence de risque de déformation excessive et d'instabilité plastique des calottes de cuve, vérifiée dans le dossier de conception.

La démarche de justification proposée par AREVA comprend 3 étapes principales :

1. la détermination (par calculs) d'une ténacité suffisante pour prévenir le risque de rupture brutale ;
2. l'évaluation (par essais) de la ténacité minimale dans la zone de ségrégation majeure positive du matériau ;
3. la comparaison de la ténacité minimale du matériau à la ténacité suffisante.

Pour ce qui concerne **la détermination de la ténacité suffisante**, le rapporteur souligne que celle-ci a été définie dans le dossier d'AREVA sur la base d'une liste de situations de fonctionnement, qui n'a pas pu faire l'objet d'une analyse dans le cadre de ce rapport compte tenu de la date tardive de transmission des éléments, en retenant une hypothèse fondamentale : AREVA considère que la ségrégation majeure positive est située en peau externe des calottes fabriquées et limite par conséquent son analyse du risque de rupture brutale à des défauts situés en peau externe. AREVA en déduit qu'il n'est pas nécessaire d'étudier les situations de chocs froids, uniquement susceptibles de solliciter des défauts situés en peau interne. Le rapporteur note que le programme d'essais prévoit des essais à mi-épaisseur, ce qui est de nature à valider cette hypothèse fondamentale du dossier d'AREVA. Enfin, le rapporteur souligne que le caractère exhaustif et enveloppe des situations de fonctionnement sera analysé ultérieurement.

Pour ce qui concerne **l'évaluation de la ténacité minimale par des essais**, le rapporteur note que le programme d'essais a été notablement révisé par AREVA au cours de l'instruction. En particulier, le positionnement des éprouvettes sera optimisé suivant les résultats de la cartographie chimique réalisée par spectrométrie en surface des tranches découpées à différentes profondeurs de la calotte (1/4 épaisseur et 1/2 épaisseur) destinées aux essais mécaniques : cette disposition est de nature à obtenir des résultats d'essais dans les zones présentant la teneur en carbone la plus élevée.

Le programme d'essais sera finalement réalisé sur deux calottes — une calotte supérieure du projet UK et une calotte inférieure du projet UA —, ce qui permettra d'apprécier l'étendue et la profondeur de la zone ségrégée dans ces deux calottes dont les épaisseurs usinées sont différentes. Par ailleurs, le

rapporteur considère que des mesures de propriétés mécaniques sur une calotte provenant d'une coulée différente de la calotte supérieure UK sont de nature à améliorer la confiance dans les résultats obtenus.

Pour ce qui concerne **la comparaison de la ténacité minimale du matériau à la ténacité suffisante**, le rapporteur souligne que la démarche d'AREVA diffère selon les situations de fonctionnement :

- pour les épreuves hydrauliques, AREVA propose de positionner les valeurs de ténacité mesurées dans la zone ségréguée, issues des résultats du programme d'essais, au regard de la courbe ZG 6110 du RCC-M, indexée sur trois températures de référence distinctes, considérées successivement. La comparaison consiste à vérifier que les valeurs de ténacité mesurées sont supérieures aux valeurs de la courbe indexée et que la ténacité minimale, déduite de la courbe à la température d'épreuve, est supérieure à la ténacité suffisante. Le rapporteur considère que seule la démarche basée sur une indexation de la courbe sur la RT_{NDT} mesurée dans la zone de ségrégation majeure positive est acceptable ;
- pour les situations de fonctionnement de la démonstration de sûreté, AREVA propose de vérifier un critère de résilience à $\frac{1}{2}$ épaisseur afin de valider l'hypothèse retenue pour la sélection des situations limitatives. Toutefois, en fin d'instruction, AREVA a indiqué que dans le cas où la résilience mesurée à mi-épaisseur ne respecterait pas le critère retenu, les mesures de ténacité également prévues à mi-épaisseur lui permettraient de démontrer que la ténacité du matériau y est suffisante. Le rapporteur souligne que ceci remet en cause la définition de la ténacité suffisante proposée par AREVA et donc la démarche de justification associée.

La démarche de justification qu'AREVA propose est une analyse du comportement mécanique à la rupture des calottes du fond et du couvercle de la cuve de Flamanville 3, fondée sur des essais menés sur une pièce sacrificielle représentative. Cette démarche pourrait mettre en évidence, le cas échéant, des marges significatives par rapport aux risques redoutés, qui permettraient alors de conclure que le procédé de fabrication confère des propriétés mécaniques au matériau d'un niveau suffisant pour prévenir ces risques. Toutefois, cela ne permettra pas d'apporter la garantie de haute qualité de fabrication, qu'apportent l'utilisation de la meilleure technique disponible et une qualification technique satisfaisante, attendue pour un composant en exclusion de rupture tel que la cuve.

Annexe 1 : Tableaux et figures

Liste des tableaux

Tableau 1 : Composants de la cuve.....	15
Tableau 2 : Matériaux des principaux composants de la cuve	16
Tableau 3 : Evolution des poids de lingots et tôles utilisés pour les fonds et couvercles des différentes cuves françaises.....	17
Tableau 4 : Comparaison des dimensions des calottes de cuve EPR et N4.....	18
Tableau 5 : Comparaison des gammes de forgeage des calottes inférieure et supérieure FA3	20
Tableau 6 : Séquences d'usinage après emboutissage.....	21
Tableau 7 : Coefficients de marge de l'annexe ZG 3230 du RCC-M	34
Tableau 8 : Défauts potentiels attendus dans les calottes	36
Tableau 9 : Spécification des défauts inacceptables dans les calottes	36
Tableau 10 : Évaluation des capacités de détection des défauts réalisée dans le cadre de l'EPR UK.....	38
Tableau 11 : Résultats des calculs de mécanique de la rupture pour les situations d'épreuve	43
Tableau 12 : RT_{NDT} admissible lors des épreuves hydrauliques.....	44
Tableau 13 : Comparaison des compositions chimiques des calottes supérieures FA3, UA et UK	47
Tableau 14 : Comparaison des compositions chimiques des calottes inférieures FA3, UA et UK	47
Tableau 15 : Epaisseur usinée (en mm) au centre des calottes supérieures et inférieures	48
Tableau 16 : Récapitulatif des paramètres essentiels de fabrication des calottes supérieures et inférieures FA3, UA et UK	48
Tableau 17 : Teneur en carbone en surface des calottes FA3, UK et UA mesurée par spectrométrie d'émission optique induite par étincelage pour les surfaces externes et par fusion de copeaux prélevés en cours de fabrication pour les surfaces internes.	49
Tableau 18 : Normes applicables et laboratoires d'essais retenus	55
Tableau 19 : Résultats obtenus sur les dômes elliptiques sacrificiels de générateurs de vapeur de remplacement de réacteurs de 900 MWe	58

Liste des figures

Figure 1 : Schémas de la cuve de Flamanville 3, les calottes sont identifiées en couleur	15
Figure 2 : Morphologie des ségrégations d'un lingot conventionnel	19
Figure 3 : Position de la pièce dans un lingot conventionnel réalisé par JSW	22
Figure 4 : Localisation des éprouvettes de traction et de flexion dans la carotte centrale de la calotte supérieure UA	25
Figure 5 : Concentration en carbone en fonction de la distance au centre de la surface externe de la calotte supérieure UA	26
Figure 6 : Morphologie des ségrégations dans un lingot LSD et un lingot conventionnel	28
Figure 7 : Démarche générale de justification	32
Figure 8 : Courbe ZG6110 du RCC-M indexée	32
Figure 9 : Effet du décalage de la température de transition sur la ténacité	33
Figure 10 : Contrôle par US en ondes transversales à 45° réalisés sur les calottes et sens de palpéage	37
Figure 11 : Positionnement du chargement sous choc chaud lors du démarrage normal par rapport à la courbe de ténacité.	43
Figure 12 : Évolution de la teneur en carbone sur 4 axes géométriques des calottes supérieures	49
Figure 13 : Schéma de découpe de la calotte supérieure UK	50
Figure 14 : Cartographie du taux de carbone dans l'épaisseur de la calotte supérieure UK	50
Figure 15 : Positionnement des morceaux de 800 x 400 mm	51

Figure 16 : Découpe des différentes tranches dans l'épaisseur.....	52
Figure 17 : Cartographie chimique en carbone sur les différentes tranches	53
Figure 18 : Prélèvement de copeaux sur éprouvettes de traction et de résilience	53
Figure 19 : Prélèvement de copeaux sur éprouvette CT 12,5	54
Figure 20 : Prélèvement de copeaux sur éprouvette CT 25	54
Figure 21 : Démarche détaillée de justification - Enchaînement des tests	60
Figure 22 : Diminution de K_{IC} selon l'indexation de la courbe de l'annexe ZG 6110.	62
Figure 23 : Défauts désorientés : Le « tilt » et le « skew »	72
Figure 24 : Évaluation par simulation de la détection de défauts à facies rugueux de dimensions 5 x 20 et 10 x 20, perpendiculaires à la peau externe ou légèrement désorientés	73
Figure 25 : Évaluation par simulation de la détection de défauts à facies parfaitement lisse de dimensions 5 x 20 et 10 x 20, perpendiculaires à la peau externe ou légèrement désorientés	73
Figure 26 : Calotte UA. Évaluation de la transition de résilience entre zone de recette et ¼ épaisseur tête	74

Annexe 2 : Exigences réglementaires antérieures

- **Arrêté du 26 février 1974 en référence [5]**

L'arrêté du 26 février 1974 était applicable pour la construction de l'ensemble des circuits primaires principaux des réacteurs français actuellement en exploitation en France.

Exigence de qualification

Cet arrêté ne prescrivait pas de démarche de qualification des matériaux.

Exigences essentielles portant sur les propriétés des matériaux

Cet arrêté imposait des exigences sur les caractéristiques mécaniques des matériaux dans son article 16 :

« § 1. - Les matériaux seront choisis de façon à éviter tout risque de rupture brutale en exploitation.

§ 2. - Les matériaux destinés à être assemblés par des joints soudés présenteront une aptitude satisfaisante au soudage dans les conditions prévues et permettant en outre de satisfaire aux dispositions de l'article 23.

§ 3. - Mis à part le cas prévu à l'article 17, seront considérés a priori comme ne satisfaisant pas aux conditions précédentes :

- les aciers dont le maximum de la résistance à la traction, à 20 °C, excède 70 hbar (1) ou dont l'allongement pour cent après rupture est inférieur à 18 ;

- les aciers dont la valeur moyenne à 0 °C de la résilience dite KCV, mesurée sur trois éprouvettes, est inférieure à 5 daJ/cm² pour un maximum de la résistance à la traction inférieur à 60 hbar ou inférieur à 7 daJ/cm² pour un maximum de la résistance à la traction compris entre 60 et 70 hbar.

§ 4. - Le constructeur pourra toutefois employer, sous réserve des observations du chef d'arrondissement minéralogique chargé du contrôle, un acier qui ne répond pas aux prescriptions du paragraphe 3, s'il peut justifier ce choix de façon probante en ce qui concerne l'aptitude au soudage de cet acier et le risque de rupture brutale tant dans le métal de base que dans les régions intéressées par la soudure. A cet effet, il joindra au dossier prévu à l'article 14 un rapport justificatif. »

Pour le matériau de la cuve, la valeur de résilience à retenir est de 7 daJ/cm². La valeur physique est une énergie par une surface. Cependant, la valeur mesurée dans les essais Charpy dépend non seulement de la surface mais également de la géométrie de l'éprouvette et de celle de l'entaille. On ne peut donc pas utiliser cette valeur pour calculer l'énergie de rupture pour un échantillon d'une autre section par simple multiplication avec la nouvelle section. Afin de pouvoir comparer les mesures de différentes expériences, il est apparu absolument nécessaire, de standardiser la section et la taille des éprouvettes. Ceci a été fait au travers d'une norme ISO. L'éprouvette la plus commune a une taille de 10x10 mm² et une entaille en V de 2 mm de profondeur. Cela correspond à une surface utile de 8x10 mm². La valeur de l'arrêté du 26 février 1974 pour l'acier de la cuve correspond ainsi à une valeur de 70 x 0,8 = 56 J. Cette valeur est comparable à celles spécifiées dans les règles techniques en référence [8] et l'arrêté en référence [6] car l'éprouvette est la même.

Il est à noter que le §4 de l'article 16 permet au constructeur de s'affranchir du respect de cette valeur s'il peut justifier ce choix de façon probante en ce qui concerne, notamment, le risque de rupture brutale dans le métal de base.

- **Règles techniques de 1999 en référence [8]**

En 1999, il est apparu nécessaire de préciser les règles techniques pour la construction des nouveaux circuits primaires et secondaires principaux. Ces règles sont les prémices des exigences essentielles de l'arrêté ESPN en référence [6]. Elles ont fait l'objet de plusieurs séances de la section permanente nucléaire (SPN) de la CCAP.

Exigence de qualification

Ces règles instaurent une qualification de certaines opérations de fabrication : « *Les opérations de fabrication devant faire l'objet d'une qualification sont définies. En particulier, les opérations de revêtement, de soudage et de fonderie sont soumises à qualification* ».

Exigences portant sur les propriétés des matériaux

Par ailleurs, ces règles imposent des caractéristiques minimales des matériaux : « *Sauf justification particulière, les matériaux choisis doivent présenter des caractéristiques en valeur individuelle, en qualification et en recette, conformes aux règles des points 2 à 4 ci-dessous. [...]* »

3. *Les matériaux à structure ferritique autres que ceux de boulonnerie doivent présenter, y compris dans les soudures (recette et coupons témoins), un allongement à rupture à température ambiante supérieur ou égal à 20 %, une énergie de flexion par choc sur éprouvette ISO V à 0°C supérieure ou égale à 40 J et une résistance à la traction à température ambiante limitée à 800 MPa. La limite de 40 J est portée à 60 J pour les matériaux dont la résistance à la traction à température ambiante est supérieure ou égale à 600 MPa.*

Pour l'acier de la cuve, la valeur de résilience minimale est de 60 J en valeur individuelle, en recette et en qualification.

Annexe 3 : Performances des contrôles

Paramètres d'entrée pour l'estimation des performances par simulation du contrôle en OT 45°

L'évaluation de ces performances a fait l'objet d'une simulation de l'IRSN, au moyen du code CIVA dans sa dernière version ; cette simulation prend en compte l'ensemble des données d'entrée du mode opératoire des contrôles par ultrasons, décrit dans la note en référence [11]. Une adaptation des données d'entrée est toutefois faite pour limiter les simulations à la profondeur de la calotte située entre la demi-épaisseur et le fond de la calotte soit 145 mm. Ces données d'entrée sont les suivantes :

- palpeur OT 45° de type WB45-N2 ;
- quatre trous d'étalonnage "génératrice" de \varnothing 2 mm, similaires à ceux utilisés pour l'étalonnage du palpeur OT 45°, implantés dans la demi-épaisseur externe de la calotte du fond de cuve concernée par les anomalies du matériau ; ils sont répartis entre 70 mm et 145 mm (épaisseur totale de la calotte du fond de la cuve) ;
- application d'une courbe de correction d'amplitude DAC sur les quatre trous, afin d'avoir une référence à 0 dB sur chacun des 4 trous lors de l'analyse des résultats de simulation ;
- choix d'une maquette de simulation plane : compte tenu du rayon de courbure du fond de la cuve important (2695 mm de rayon intérieur), il n'est ni nécessaire ni utile d'utiliser une maquette courbe, compte tenu de la très faible influence de la lame d'eau présente sous le palpeur ;
- implantation de réflecteurs plans dans la pièce simulée, adaptée à la vérification des performances de détection des défauts plans dans les deux directions de sondage, circonférentielle et axiale, mentionnées sur la Figure 10 ;
- choix des réflecteurs plans, dont la détection est simulée :
 - défauts plans de dimension 5 x 20, 10 x 20, avec un faciès très lisse, à différentes profondeurs, perpendiculaires et légèrement désorientés ;
 - défauts plans de dimension 5 x 20, 10 x 20, avec un faciès rugueux, à différentes profondeurs, perpendiculaires et légèrement désorientés.

Les simulations ont été réalisées pour des défauts plans rugueux (Figure 24) et pour des défauts plans hypothétiques parfaitement lisses (Figure 25).

Résultats de la simulation de l'IRSN pour le contrôle en OT 45°

Les résultats des simulations réalisées sur des défauts hypothétiques à faciès à la fois rugueux et lisses, confirment bien les performances annoncées par le constructeur.

Suivant les dispositions du code RCC-M, les défauts plans de hauteur 5 et 10 mm à faciès rugueux, débouchant ou éloignés de 20 mm par rapport à la surface externe, sont tous notés et rejetés dans les cas retenus pour les simulations lorsqu'ils sont perpendiculaires ou désorientés légèrement en « tilt » (cf. Figure 23 pour la définition des angles de « tilt » et de « skew »).

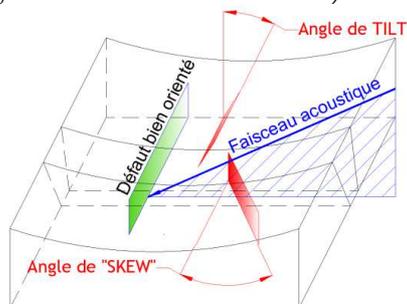


Figure 23 : Défauts désorientés : Le « tilt » et le « skew »

Les défauts à faciès rugueux très éloignés de la peau externe (au-delà de 20 mm) seraient également notés et rejetés, lorsqu'ils restent perpendiculaires. Les défauts désorientés avec un léger « skew » de 5° apparaissent notables et même rejetables lorsqu'ils sont débouchants ou avec un ligament faible (environ 10 mm). Ces mêmes défauts avec « skew » ne seraient toutefois pas nécessairement notés et rejetés selon les critères du RCC-M lorsqu'ils sont très éloignés de la peau externe (au-delà de 20mm). Ceci est visible directement sur les cartographies qui montrent que la couleur des défauts ou le rouge est prédominant, correspond à des défauts dont l'amplitude est supérieure à l'amplitude 0 dB du trou génératrice de 2 mm de diamètre, ce qui conduit au rejet des défauts.

Suivant les dispositions du code RCC-M, les défauts plans de hauteur 5 et 10 mm à faciès très lisses, sont également tous notés et rejetés lorsqu'ils sont débouchant ou éloignés de 20 mm par rapport à la surface externe, dans les cas retenus pour les simulations réalisées, lorsqu'ils sont perpendiculaires ou désorientés légèrement en « tilt ». Ces mêmes défauts perpendiculaires seraient notés mais pas nécessairement rejetés lorsqu'ils sont très éloignés de la peau externe (au-delà de 20 mm).

Les défauts désorientés avec un léger « skew » de 5° apparaissent notables et même rejetables lorsqu'ils sont débouchants ou avec un ligament faible (environ 10 mm). Ces mêmes défauts avec un très faible « skew » sont plus difficilement notables que les défauts rugueux lorsque le ligament dépasse 10 mm.

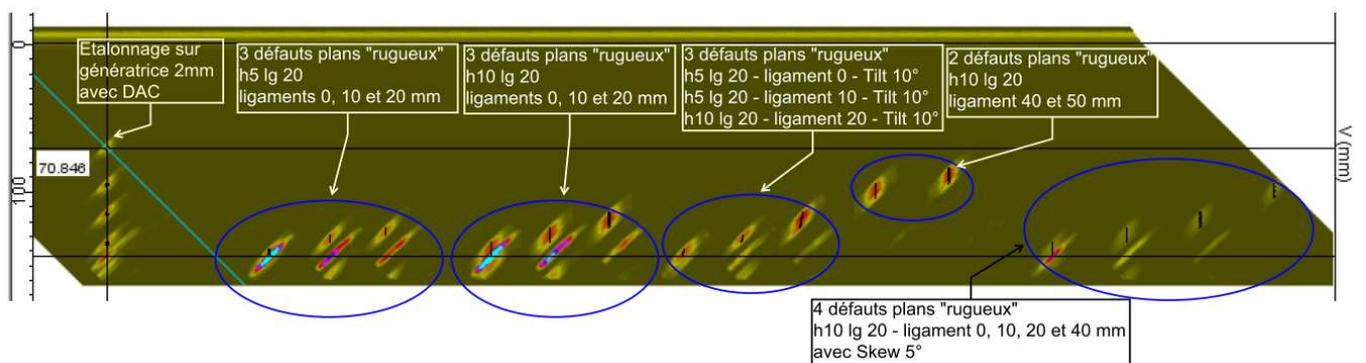


Figure 24 : Évaluation par simulation de la détection de défauts à faciès rugueux de dimensions 5 x 20 et 10 x 20, perpendiculaires à la peau externe ou légèrement désorientés



Figure 25 : Évaluation par simulation de la détection de défauts à faciès parfaitement lisse de dimensions 5 x 20 et 10 x 20, perpendiculaires à la peau externe ou légèrement désorientés

Annexe 4 : Estimation a priori du décalage de RT_{NDT} dans la zone de ségrégation majeure positive

Dans un premier temps, AREVA a exploité les résultats des essais de résiliences réalisés sur la calotte supérieure UA pour estimer le décalage en température de la RT_{NDT} de la zone ségrégée de la calotte supérieure UA par rapport à la zone de recette en considérant deux approches :

- **une approche réaliste** : la RT_{NDT} déterminée selon la démarche codifiée dans le RCC-M est imposée par les essais Charpy (température pour laquelle la valeur minimale de résilience est supérieure à 68 J en valeur individuelle) et non par les essais Pellini. À partir des résultats de résilience à 0 °C dans la calotte UA, il est donc possible d'estimer l'impact de la ségrégation sur la RT_{NDT}. Les valeurs obtenues des 6 essais Charpy en ¼ épaisseur supérieur de la calotte supérieure UA conduisent à une résilience moyenne K_v_{moy} à 0 °C de 52 J et à une valeur minimale K_v_{min} de 36 J.

En retenant une évolution de l'énergie de résilience avec la température, dans la zone de transition, de 1,5 J par °C et un ratio de 0,7 pour le rapport entre la valeur moyenne et la valeur minimale de la résilience, cela donne :

$$\Delta RT_{NDT} = (68/0,7 - K_{v_{moy}})/1,5 = 30 \text{ °C}$$

$$\Delta RT_{NDT} = (68 - K_{v_{min}})/1,5 = 21 \text{ °C}$$

- **une approche plus conservatrice** : à partir des essais Charpy réalisés sur la zone de recette et sur la zone centrale au quart-épaisseur, coté tête de la calotte UA, il est possible d'indexer approximativement une courbe de résilience pour chaque zone. La distance entre ces deux courbes permet de déterminer une mesure conservatrice du décalage en température. La Figure 26 ci-dessous présente cette construction conduisant à une estimation du décalage des courbes de résilience de l'ordre de 70 °C.

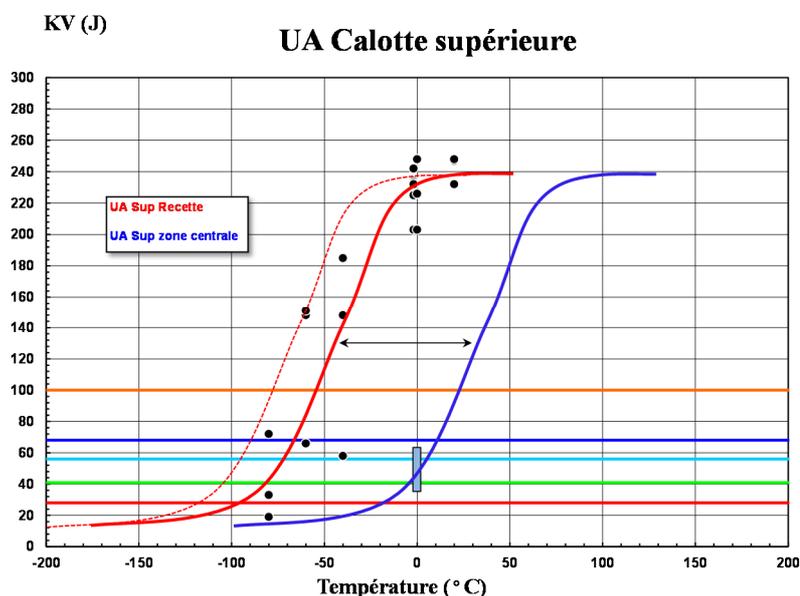


Figure 26 : Calotte UA. Évaluation de la transition de résilience entre zone de recette et ¼ épaisseur tête

AREVA en déduit 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.

Annexe 5 : Température de référence T_0

La température de référence T_0 est utilisée pour l'indexation de la courbe dite « MASTER_CURVE » introduite dans la norme ASTM E1921, décrivant l'évolution des aciers ferritiques dans leur domaine de comportement fragile-ductile, à l'instar de la RT_{NDT} utilisée pour l'indexation de la courbe ZG 6110 du RCC-M. T_0 est déterminée par des essais de ténacités sur des éprouvettes pouvant être de petites tailles (d'une épaisseur de 12,5 mm par exemple). Un faible nombre d'essais est requis. Pour un matériau homogène, une dizaine d'essais sont suffisants pour déterminer T_0 avec une bonne précision.

Pour mémoire, la température de transition (RT_{NDT}), sur laquelle est indexée la courbe de ténacité du RCC-M, est caractérisée par des essais de type choc (essais Pellini associés à des essais Charpy). Ces essais dynamiques sont très différents des essais de ténacité qui sont des essais d'amorçage de fissure sous chargement quasi-statique.

Ainsi, la RT_{NDT} est une température de référence déduite d'essais de caractérisation de l'amorçage de la rupture, de la déchirure et de l'arrêt de fissure, alors que la température de référence T_0 est déduite d'essais dédiés à l'amorçage de la rupture.

Dans son dossier, AREVA propose comme alternative à l'indexation de la courbe ZG 6110 du RCC-M sur la RT_{NDT} déterminée selon le protocole défini par le code, d'indexer cette courbe sur la température RT_{T_0} introduite par l'EPRI et égale à $T_0+19,4$ °C. AREVA prend en compte une pénalisation supplémentaire de 20 °C sur la température RT_{T_0} pour assurer que courbe de l'annexe ZG 6110 ainsi indexée reste une courbe enveloppe minimale des données expérimentales de ténacité à l'origine de la courbe RCC-M.

Annexe 6 : Appréciation des incertitudes, des facteurs de sécurité et des marges

1. Incertitudes et facteurs de sécurité

Le décret en référence [3] impose « *d'appliquer des facteurs de sécurité permettant d'éliminer entièrement toutes les incertitudes découlant de la fabrication, des conditions réelles d'utilisation, des contraintes, des modèles de calcul, ainsi que des propriétés et du comportement du matériau.* »

Dans le contexte général de justification du respect des exigences de la réglementation relatives aux équipements sous pression nucléaires, il a été constaté des difficultés à ce sujet, qui doivent être traitées par un programme d'actions en cours de définition par les industriels.

AREVA, pour ce dossier des calottes de la cuve de FA3, a présenté les éléments dont il dispose à ce jour sur cette question.

Les sources d'incertitudes liées au choix de la calotte UK pour la réalisation des essais sont traitées dans le cadre de la question de sa représentativité (cf. §4.3).

Les autres sources d'incertitudes concernent la détermination des caractéristiques mécaniques, la définition du défaut et les modèles de calcul.

En ce qui concerne la détermination des caractéristiques mécaniques, la prise en compte des facteurs de sécurité suivants est indiquée par AREVA :

- les normes en vigueur pour les essais mécaniques, à l'exception des essais Pellini, englobent des facteurs de sécurité au travers d'exigences sur la précision des moyens de mesures (force, capteur d'ouverture, mesure de température). AREVA considère en conséquence que l'impact des incertitudes est négligeable. Ces essais seront réalisés par un laboratoire accrédité ISO 17025 (cf. §4.3). AREVA indique qu'à titre informatif et en complément, une quantification des incertitudes sera réalisée ;
- la courbe de ténacité de l'annexe ZG 6110 du RCC-M est une courbe enveloppe minimale déterminée pour couvrir la variabilité importante des résultats d'essais dans le domaine fragile causée par la distribution des défauts microstructuraux au sein de la matrice ;
- les effets de vieillissement thermique et après déformation sont enveloppés par un décalage enveloppe de +15 °C.

En ce qui concerne la dimension du défaut, AREVA a pris en compte une valeur enveloppe déduite d'une évaluation de la performance des essais non destructifs mis en œuvre (cf. § 4.2.2).

En ce qui concerne les modèles de calcul, AREVA indique avoir eu recours à des logiciels qualifiés et à des hypothèses de calculs enveloppes, comparables aux moyens mis en œuvre pour le dossier de tenue en service des cuves des réacteurs français d'EDF.

Position du rapporteur

Les incertitudes relatives aux essais sont traitées au §4.3.

Le rapporteur rappelle la réserve et la recommandation qu'il a émises concernant l'hypothèse de vieillissement retenue (cf. § 4.2.3.3).

2. Marges implicites procurées par des hypothèses enveloppes prises en compte

Par commodité de calcul, AREVA a retenu certaines hypothèses simplificatrices enveloppes. Elles procurent selon lui des marges implicites qu'il a tenté d'explicitier et de quantifier.

La démarche visant à définir une température d'indexation de la courbe de ténacité enveloppe intègre une marge implicite dépendant du mode d'indexation. Selon AREVA, une indexation sur la RT_{NDT} locale déduite des essais sera plus pénalisante qu'une indexation sur RT_{T0} , qui sera cependant pénalisée de 20 °C pour assurer son caractère enveloppe.

Concernant la définition des transitoires de fonctionnement, AREVA indique qu'un certain nombre de paramètres physiques favorables n'ont pas été pris en compte.

Concernant l'orientation et la localisation retenues pour les défauts analysés, AREVA indique qu'elles intègrent une marge implicite. Le défaut est considéré débouchant et perpendiculaire à la peau alors que le procédé de fabrication favorise au contraire une orientation parallèle aux peaux des défauts potentiels et vise à éliminer les défauts plans perpendiculaires à la surface, qui sont par ailleurs détectables par les essais non destructifs mis en œuvre, a fortiori s'ils sont débouchants.

AREVA a mené des calculs simplifiés comparant, pour différents angles, le facteur d'intensité de contraintes d'un défaut interne incliné à celui d'un défaut perpendiculaire débouchant. Le rapport de ces facteurs d'intensité de contraintes varie de 2 à 6 pour un défaut incliné de 60 à 75 degrés par rapport à la perpendiculaire à la peau.

Position du rapporteur

Comme le rapporteur l'indique au § 4.2.3.6.2, les situations et charges prises en compte seront instruites ultérieurement par le rapporteur.

Le rapporteur partage le fait que l'orientation et la localisation retenues pour les défauts analysés par AREVA incorporent des marges implicites. Il considère que ces marges implicites peuvent être prises en compte dans l'appréciation des résultats de la démarche à partir d'une inclinaison importante (de 60 degrés) du défaut par rapport à la normale à la paroi.

3. Appréciation de l'effet de la zone ségréguée sur les marges par rapport aux critères

Le rapporteur considère qu'il est utile d'éclairer de façon globale l'application de l'ensemble de la démarche de justification d'une ténacité suffisante en termes d'effets de la zone ségréguée sur les marges par rapport aux critères.

AREVA, pour répondre à cette demande, s'est engagé à la fin de l'instruction :

« à fournir, avant le GP ESPN 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 ségréguée, 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 la lettre [référence].

Les décalages de RT_{NDT} retenus, égaux à +35 °C et +70 °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_{ϕ}) et la température à laquelle est obtenue cette marge minimale. Ces données seront évaluées :

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

Le rapporteur considère que cet engagement correspond à la demande qu'il a exprimée.