

Fontenay-aux-Roses, le 3 avril 2015

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

Avis IRSN N° 2015-00118

Objet : EPR Flamanville 3 - Qualification technique des calottes du couvercle et du corps de la cuve du réacteur

Réf. : Lettre ASN CODEP-DEP-2015-011372 du 25 mars 2015

Par lettre citée en référence, l'ASN demande l'avis de l'IRSN sur les premiers éléments transmis par AREVA pour justifier le caractère suffisant de la ténacité du matériau des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville. Ceux-ci concernent le choix de la pièce sélectionnée pour réaliser des essais de ténacité sur une pièce sacrificielle, représentative des calottes inférieure et supérieure de la cuve, et le programme de découpe de cette pièce.

AREVA doit transmettre prochainement des éléments complémentaires concernant le programme d'essais et la démarche retenue pour justifier le caractère suffisant de la ténacité du matériau des calottes de cette cuve ; ils feront l'objet d'un avis ultérieur de l'IRSN.

Contexte des essais complémentaires

Des essais, demandés en 2012 dans le cadre de la justification de la conformité des calottes de cuve du réacteur EPR de Flamanville aux exigences de l'arrêté ESPN du 12 décembre 2005, ont montré en 2014, sur une carotte prélevée au centre d'une calotte de couvercle représentative des calottes du réacteur EPR de Flamanville, des valeurs de résilience à 0°C ne respectant pas le critère défini dans l'arrêté précité.

Les analyses réalisées ont montré que des ségrégations majeures positives de carbone en partie centrale de cette calotte étaient à l'origine de ces résultats. La présence de ces ségrégations découle du procédé de fabrication des calottes retenu par Creusot Forge, à partir de lingots de fort tonnage. Ce procédé diffère de ceux employés pour les calottes des cuves des réacteurs du parc en exploitation. A cet égard, l'IRSN observe qu'une évolution notable de technologie de fabrication a été adoptée sans la qualification préalable requise par le RCCM et les règles techniques applicables au projet EPR. De plus, les résultats d'analyses chimiques effectuées au cours de la fabrication, qui avaient montré d'importantes ségrégations majeures positives au centre de la calotte de couvercle du réacteur EPR de Flamanville, n'avaient pas conduit alors à s'interroger sur l'origine et les conséquences potentielles de cette ségrégation.

Adresse courrier
BP 17
92262 Fontenay-aux-Roses
Cedex France

Siège social
31, av. de la Division Leclerc
92260 Fontenay-aux-Roses
Standard +33 (0)1 58 35 88 88
RCS Nanterre B 440 546 018

Les derniers examens réalisés en 2015 par spectrométrie par étincelage montrent que les calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville présentent des zones de ségrégation majeure positive avec un $\Delta C/C^{(1)}$ de l'ordre de 50 % en peau extérieure, valeur très supérieure à celles des mêmes types de pièces des réacteurs du parc en exploitation (maximum de 20 % à 25 %). L'IRSN retient que l'évolution de la technologie de fabrication qui a été mise en œuvre a conduit à s'écarter du domaine couvert par les nombreux essais mécaniques disponibles pour les aciers des cuves des réacteurs français existants.

Les raisons qui ont conduit à cette situation doivent être identifiées et les enseignements doivent en être tirés.

Choix de la calotte sélectionnée pour réaliser les essais complémentaires et programme de découpe associé

AREVA propose la réalisation d'essais complémentaires sur la calotte supérieure de la cuve initialement destinée au réacteur EPR Hinkley Point C, pièce jugée représentative des calottes du réacteur EPR de Flamanville, et présente le programme de découpe de cette calotte en vue des essais retenus.

L'IRSN estime que les éléments apportés par AREVA pour justifier le choix de cette calotte comme pièce sacrificielle représentative des calottes de cuve du réacteur EPR de Flamanville sont convenables. Toutefois, compte tenu du taux de ségrégation dans les autres calottes disponibles, celles-ci seraient également exploitables pour des essais complémentaires.

Par ailleurs, l'IRSN considère que le programme de découpe de la calotte, qui vise à déterminer la zone de ségrégation maximale, est pertinent et que les analyses proposées sont de nature à mieux appréhender la répartition des ségrégations majeures positives dans le volume de cette calotte. Néanmoins, compte tenu du volume limité de la zone ségrégée, le nombre d'éprouvettes prélevées sera très réduit, notamment pour des essais de ténacité qui présentent usuellement une dispersion importante. A cet égard, l'IRSN estime que le programme d'essais prévu par AREVA n'apparaît pas de nature à apporter des garanties équivalentes à celles provenant des très nombreux résultats issus des essais mécaniques réalisés pour les aciers des cuves des réacteurs du parc.

Pour le directeur général, par ordre
Sylvie CADET-MERCIER

Directrice des systèmes, des nouveaux
réacteurs et des démarches de sûreté

⁽¹⁾ Ratio entre la différence entre la teneur locale en carbone mesurée à un endroit de la pièce et la teneur moyenne en carbone rapportée à la teneur moyenne

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

Réacteur EPR Flamanville 3 Qualification technique des calottes du couvercle et du corps de la cuve du réacteur

PÔLE SÛRETÉ DES INSTALLATIONS
ET DES SYSTÈMES NUCLÉAIRES

FT/AV/PSN/2015-00067

Fiche technique en support de l'avis IRSN/2015-00118
du 3 avril 2015

TABLE DES MATIÈRES

REFERENCES.....	3
1 OBJET	5
2 CALOTTES DE LA CUVE DU REACTEUR EPR FLAMANVILLE 3	6
2.1 PRESENTATION	6
2.2 FABRICATION DES CALOTTES EPR	7
2.3 COMPARAISON AVEC LES CONDITIONS DE FABRICATION RETENUES POUR LE PARC EN EXPLOITATION	8
2.4 ANALYSE IRSN	9
3 CARACTERISATIONS SUR CALOTTES	13
3.1 CARACTERISATIONS REALISEES	13
3.2 CARACTERISATIONS COMPLEMENTAIRES PROPOSEES	16
4 CONCLUSIONS DE L'IRSN	20

REFERENCES

- [1] Document AREVA - EFF DS 079 révision C du 26 janvier 2010 : « Synthèse de qualification technique de la calotte inférieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville ».
- [2] Document AREVA - EFF DS 076 révision D du 15 janvier 2010 : « Synthèse de qualification technique de la calotte supérieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville ».
- [3] Document AREVA - MDHTDM DT 14.028 révision A du 1^{er} décembre 2015 : « Résultat des essais complémentaires réalisés sur une carotte de la calotte UA ».
- [4] Document AREVA - MDHTIM DT 1884 révision A du 5 février 2015 : « Comparaison des PTF, des essais de recette et des QT des pièces fabriquées par AREVA CF. Calottes supérieures et inférieures de FA3 UA et UK ».
- [5] Document AREVA - MDHTIM DT 15.003 révision A du 29 janvier 2015 : « Détermination du taux de C par spectrométrie portative sur calotte inférieure UA ».
- [6] Document AREVA MDHTIM DT 15.008 révision A du 29 janvier 2015 : « Détermination du taux de C par spectrométrie portative sur calotte inférieure FA3 ».
- [7] Document AREVA - MDHTIM DT 15.001 révision A du 29 janvier 2015 : « Détermination du taux de C par spectrométrie portative sur calotte supérieure comparée à celle d'UA et UK ».
- [8] Document AREVA - PFCSGN/NCR0002 révision A : « Programme d'essais sur calotte sacrificielle ».
- [9] Saisine ASN.CODEP-DEP-2015-011372 du 25 mars 2015 : « Qualification technique des calottes du couvercle et du corps de la cuve du réacteur de l'EPR Flamanville 3 ».
- [10] PTF 134 révision E du 05 octobre 2007- CREUSOT Forge Programme de Fabrication Calotte inférieure.
- [11] PTF 131 révision G du 04 avril 2007- CREUSOT Forge Programme de Fabrication Calotte supérieure.
- [12] Document EDF - EFM MN 01-014-A du 13 juin 2001 : « Identification des zones du CPP susceptibles d'être le siège de défauts sous revêtement ».
- [13] Document FRAMATOME ANP - EES DC 878 révision B du 02 mai 2002 : « Dossier de référence réglementaire - Lot 3 Matériaux ».
- [14] Document AREVA - EPM-15-TB-0037 révision A du 12 janvier 2015 : « Fabrication des calottes de fonds de cuves et de couvercles de cuves ».
- [15] 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».
- [16] Document FRAMATOME - EES/DC 0642 révision B du 16 septembre 1996 : « Etude des gammes de fabrication des viroles de cœur des cuves ».

- [17] Rapport BCCN - FC/MA N° 030263 du 17 juin 2003 : EPR - Virole porte tubulures de la cuve en vue de la réunion de la Section permanente nucléaire du 2 juillet 2003.
- [18] Lettre DGSNR-GRE/BCCN/DE/AR n°020252 du 10 juin 2002 : Examen des choix de conception et de fabrication des gros composants de la chaudière du projet de réacteur nucléaire EPR.
- [19] AIEA - Culture de sûreté - INSAG 4 - Vienne 1991- Rapport du groupe consultatif international pour la sûreté nucléaire.
- [20] Document AREVA - PFCSGN/NCR0003 révision C du 12 mars 2015 : « Première étape du programme d'essais sur pièce sacrificielle ».
- [21] Document AREVA NEEMF 08 211 A du 7 mars 2008 : « Dossier de qualification technique de la calotte inférieure ».
- [22] Document AREVA NEEL-F-DC 92 révision B du 2 avril 2010 : « Dossier de qualification technique de la calotte supérieure ».

1 OBJET

Pour les équipements sous pression nucléaires (ESPN) de niveau N1, l'exigence essentielle de sécurité définie au 3.2 de l'annexe 1 de l'arrêté du 12 décembre 2005 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* ».

Afin de justifier la conformité des calottes du couvercle et du fond de la cuve du réacteur EPR de Flamanville à cette exigence, AREVA a transmis à l'ASN les dossiers en références [1] [2] [21] [22] qui présentent l'analyse des risques d'hétérogénéités dans ces composants en termes de santé interne et de caractéristiques mécaniques et chimiques.

Compte tenu du procédé d'élaboration de ces composants par Creusot Forge, AREVA a identifié, en raison du poids de lingot, de la forme de lingotière et du taux de chute, le risque de ségrégations majeures positives en carbone à l'intérieur de la pièce finie. Aussi, AREVA a complété les dossiers de qualification technique en références [21] et [22] par la réalisation d'essais sur un composant élaboré dans des conditions jugées représentatives des paramètres de fabrication des calottes inférieure et supérieure du réacteur EPR de Flamanville. Ces essais ont été réalisés sur une carotte prélevée au centre d'une calotte de cuve initialement destinée à un réacteur EPR pour le marché américain (projet dit UA). Les résultats de ces essais sont présentés dans le document en référence [3]. Ils ont mis en évidence des valeurs de résilience non conformes au critère du point 4 de l'annexe 1 de l'arrêté du 12 décembre 2005 (résiliences à 0°C inférieures à 60J).

Pour traiter cet écart, AREVA a proposé, malgré des valeurs de résilience non conformes au critère précité, de justifier du caractère suffisamment tenace du matériau par la réalisation d'essais de ténacité sur une pièce sacrifiée, représentative des calottes inférieure et supérieure du réacteur EPR de Flamanville. AREVA se propose de réaliser ces essais de ténacité sur la calotte supérieure de la cuve initialement destinée au réacteur EPR Hinkley Point C et a transmis à l'ASN les documents en références [4] et [7] pour justifier ce choix ainsi que le programme d'essais envisagé [20].

Au cours d'une réunion qui s'est tenue le 18 février 2015, AREVA a explicité les documents en références [4] à [8] et a pris note des premières observations de l'ASN et de l'IRSN concernant le choix du composant sacrifié, le programme d'essais et la méthode envisagée pour compléter le dossier de conception de la cuve du réacteur EPR de Flamanville.

Dans un premier temps, l'ASN souhaite, par sa saisine en référence [9], recueillir l'avis de l'IRSN sur le choix du fabricant de procéder aux essais complémentaires sur la calotte destinée au couvercle de la cuve du réacteur EPR Hinkley Point C, qui repose sur l'hypothèse que toutes les calottes qui ont été fabriquées par Creusot Forge pour des réacteurs EPR sont représentatives du point de vue des risques liés à leurs hétérogénéités. L'ASN souhaiterait à ce stade obtenir également l'avis de l'IRSN sur le programme de découpe du composant sacrifié détaillé dans le document en référence [20].

L'objet de la présente fiche technique est d'exposer l'analyse correspondante de l'IRSN.

2 CALOTTES DE LA CUVE DU REACTEUR EPR FLAMANVILLE 3

2.1 PRESENTATION

Les calottes de fond et de couvercle de cuve sont obtenues par emboutissage d'un flan forgé plat : leurs emplacements respectifs sont rappelés sur le schéma de la cuve EPR ci-dessous.

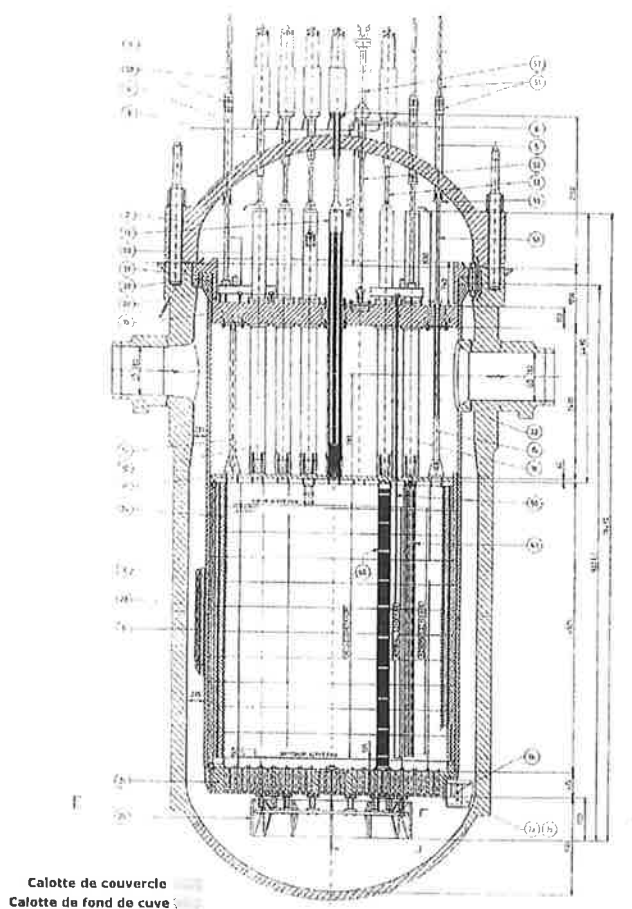


Figure 1 - Cuve EPR - emplacement des calottes de couvercle et de fond de cuve

La calotte supérieure est soudée sur la bride de couvercle pour constituer le couvercle de cuve. Cette calotte supérieure comporte des traversées, au nombre de 107, qui permettent le passage, d'une part des barres de commande des mécanismes de commande de grappes, d'autre part des dispositifs d'instrumentation du cœur. Du fait de ces nombreuses traversées, l'épaisseur de la calotte de couvercle est plus importante que celle de la calotte de fond de cuve qui ne comporte aucune traversée.

La calotte de fond de cuve est soudée sur la pièce de raccordement au corps cylindrique de la cuve constitué par la virole porte tubulure avec bride intégrée et les deux viroles de cœur. La calotte de fond de cuve n'est pas remplaçable, contrairement au couvercle⁽¹⁾ de cuve.

La cuve fait partie des composants dont la rupture n'est pas prise en considération dans le dimensionnement du réacteur (exclusion de rupture). De ce fait, l'ensemble de ses éléments constitutifs doivent être d'un niveau de qualité de réalisation très élevé.

2.2 FABRICATION DES CALOTTES EPR

Les calottes ont été fabriquées en 2006 pour la calotte supérieure et en 2007 pour celle du fond de cuve [1] [2]. Pour chacune des calottes, un lingot plein de 156 tonnes de type 2550 a été utilisé pour obtenir une ébauche forgée dont les dimensions ont été choisies par le forgeron afin de permettre la réalisation des calottes.

Après chute de la tête et du pied du lingot, respectivement de 20 % et 8 % pour la calotte inférieure et de 20 % et 9 % pour la calotte supérieure, le coefficient de corroyage⁽²⁾ obtenu après forgeage des flans est de 12,8 pour les deux calottes. Les flans subissent ensuite, 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 ». Elles sont ensuite usinées à leur profil final en vue de leur contrôle volumique par ultrasons.

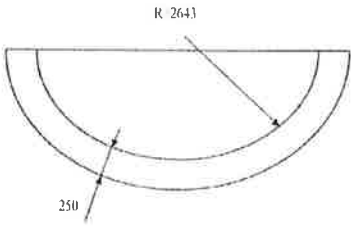
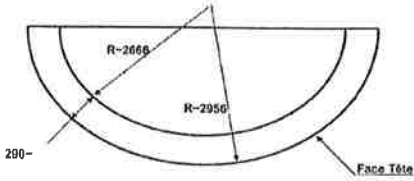
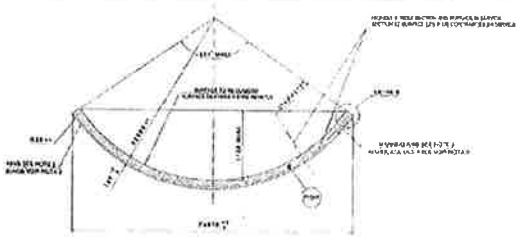
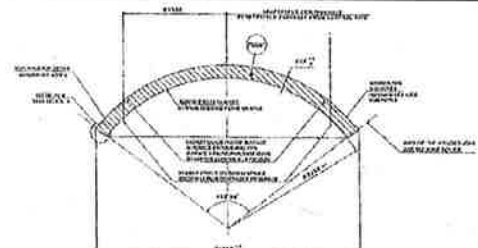
Le processus schématisé des opérations successives de forgeage des deux calottes de la cuve EPR de Flamanville 3, établi à partir des données des programmes de fabrication en références [10][11], est présenté dans le tableau A1 en annexe. Les calottes inférieure et supérieure subissent la même gamme 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 ci-après.

Les calottes sont donc 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 156 tonnes. Seuls les usinages permettent de réduire l'épaisseur de 330 mm après emboutissage à 147 mm d'épaisseur nominale pour la calotte inférieure et à 232 mm pour la calotte du couvercle.

⁽¹⁾ Tous les couvercles de cuve des centrales 900 MWe et 1300 MWe initialement équipés de traversées en alliage 600 ont été remplacés par EDF par des couvercles avec traversées en alliage 690 moins sensible à la corrosion sous contrainte.

⁽²⁾ Le coefficient de corroyage dans le cas d'un flan forgé est le rapport de la hauteur de la pièce avant forgeage à la hauteur après forgeage.

Tableau 1 - Séquences d'usinage après emboutissage

Gamme d'usinage	Calotte inférieure FA3 [10]	Calotte couvercle FA3 [11]
Usinage au profil pour Traitement de qualité (TTQ)		
TTQ		
Usinage au profil de livraison		

2.3 COMPARAISON AVEC LES CONDITIONS DE FABRICATION RETENUES POUR LES REACTEURS DU PARC EN EXPLOITATION

Suite à la découverte de valeurs de résilience inférieures au critère de l'arrêt ESPN, liées à la présence d'hétérogénéités inattendues dans les calottes de couvercle fabriquées selon le même processus que les calottes de la cuve du réacteur FA3, le fabricant a procédé à une analyse de fabrication des calottes de fond de cuve et de couvercle de cuve [14]. Cette analyse montre notamment que la gamme de fabrication des calottes de la cuve du réacteur FA3 s'écarte des conditions de fabrication retenues pour les calottes des cuves des réacteurs N4.

Pour mémoire, les calottes de fond de cuve et de couvercle des réacteurs du palier 900 MWe et celles des premiers réacteurs de 1300 MWe ont été obtenues à partir de tôles embouties ; pour la suite du palier 1300 MWe et pour les réacteurs du palier N4 [12] [13], elles ont été obtenues à partir de flans forgés issus de lingots à solidification dirigée (LSD). Un lingot LSD de 55 tonnes a été utilisé pour les calottes de fond de cuve des réacteurs du palier N4.

Les principales évolutions de conception de l'EPR, 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. Le fond de cuve N4 comporte 60 traversées nécessaires à l'instrumentation neutronique du cœur. En termes de

dimensions, 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.

Les schémas respectifs des cuves EPR et N4 sont présentés en annexe. A titre de comparaison, les dimensions respectives des calottes de cuves EPR et N4 sont données dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2 - Comparaison des dimensions des calottes de cuve EPR et N4

	Calotte de couvercle		Calotte de fond de cuve	
	EPR	N4	EPR	N4
Epaisseur	230 mm	180 mm	145 mm	144 mm
Diamètre interne cuve	4885 mm	4486 mm	4885 mm	4486 mm
Angle α	105° 30'	117°	110°	120°
Rayon interne de courbure	2695 mm	2303 mm	2695 mm	2310 mm
Nombre de traversées	106	77	0	60

L'évolution de la technologie de fabrication des calottes EPR s'est traduite par la présence de ségrégations majeures résiduelles positives en peau, dont l'importance peut être appréciée par la grandeur $\Delta C/C$, comme le montrent les résultats des mesures complémentaires réalisées par spectrométrie par étincelage sur la calotte de fond de cuve FA3. Les valeurs mesurées de $\Delta C/C$ ont atteint une valeur de l'ordre de 50 % sur la calotte de fond de cuve FA3 [6] ainsi que sur des calottes fabriquées selon le même processus [5][7].

Pour mémoire, 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 ($\Delta C/C$). En effet, la composition chimique obtenue après solidification d'un lingot n'est pas homogène dans l'ensemble du volume du fait des différences de densité et de composition chimique qui existent entre le métal qui se solidifie en premier et le métal liquide qui subsiste dans la partie non encore solidifiée. Ceci conduit à un phénomène de ségrégation lors de la solidification. Ces ségrégations, dont on cherche à limiter l'importance en cours de fabrication, subsistent néanmoins pour partie sur les pièces fabriquées.

2.4 ANALYSE IRSN

L'IRSN rappelle que le phénomène de ségrégation est bien connu pour les pièces forgées issues de gros lingots et qu'il a été largement étudié par le passé en particulier pour les viroles de la zone de cœur des cuves de réacteur. L'ampleur des ségrégations reste liée à la masse du métal coulé pour obtenir les lingots.

Pour les calottes de fond de cuve, le tableau suivant présente, à partir des informations issues de [13], la synthèse des poids et types de lingots utilisés, paramètres identifiés comme importants dans toutes les gammes de forgeage.

Tableau 3 - Evolution des poids de lingots utilisés pour les fonds des différentes cuves françaises

		Calottes de fond de cuve			
		A partir de tôles fortes embouties		A partir de flans forgés emboutis	
		CL + MARREL	JSW	Lingot LSD « Creusot »	Lingot plein « Creusot »
Palier 900 Mwe	FSH1 à C28	35 t			
Palier 1300 Mwe	Q1 A Q5		46 t		
	Q6 à Q20			48 t	
Palier N4	Chooz B1 à Civaux 2			55 t	
EPR	FA 3				156 t

L'IRSN rappelle que, pour ce qui concerne les cuves, le recours aux lingots pleins de forts tonnages a jusqu'ici été réservé à la fabrication de pièces de révolution (virole, brides, tubulures), dont la gamme de forgeage comporte une phase de perçage à chaud ou par usinage qui, par élimination de la partie centrale du lingot, conduit à supprimer l'essentiel de la ségrégation positive qui subsiste, après chutage des extrémités, dans l'axe du lingot.

Les calottes de fond de cuve ou de couvercle ont été historiquement réalisées pour les premiers réacteurs (900 MWe) à partir de tôles. L'évolution des dimensions liées aux réacteurs de plus grandes puissances (1300 MWe-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 [15].

La figure ci-dessous extraite de la publication [15] 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 nécessaire pour un lingot plein).

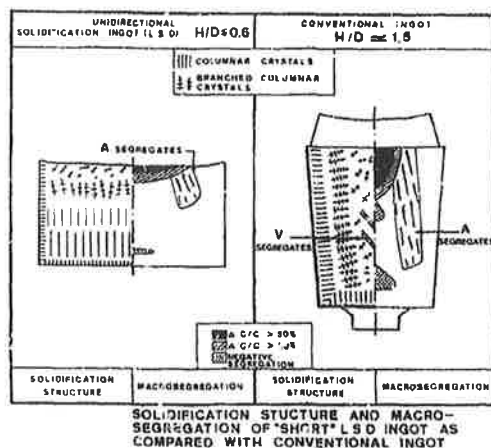


Figure 2 - Morphologie des ségrégations dans un lingot LSD et un lingot plein conventionnel

Bien que Creusot Loire ait fabriqué des pièces à partir de lingots LSD depuis 1977 pour l'industrie classique, le recours à cette technologie pour des composants de cuve a conduit, au titre des prescriptions du RCCM, à valider cette application nouvelle pour une pièce de cuve par des essais ayant nécessité le sacrifice de l'une des pièces produites [15]. Les caractérisations faites à l'époque sur un flan expérimental d'épaisseur 210 mm issu d'un lingot LSD de 45 tonnes ont confirmé que les ségrégations majeures en termes de $\Delta C/C$ restaient inférieures à 23 % [15]. Ce niveau de ségrégation est du même ordre de grandeur que celui obtenu pour les viroles de cœur issues de lingots pleins percés à chaud [13].

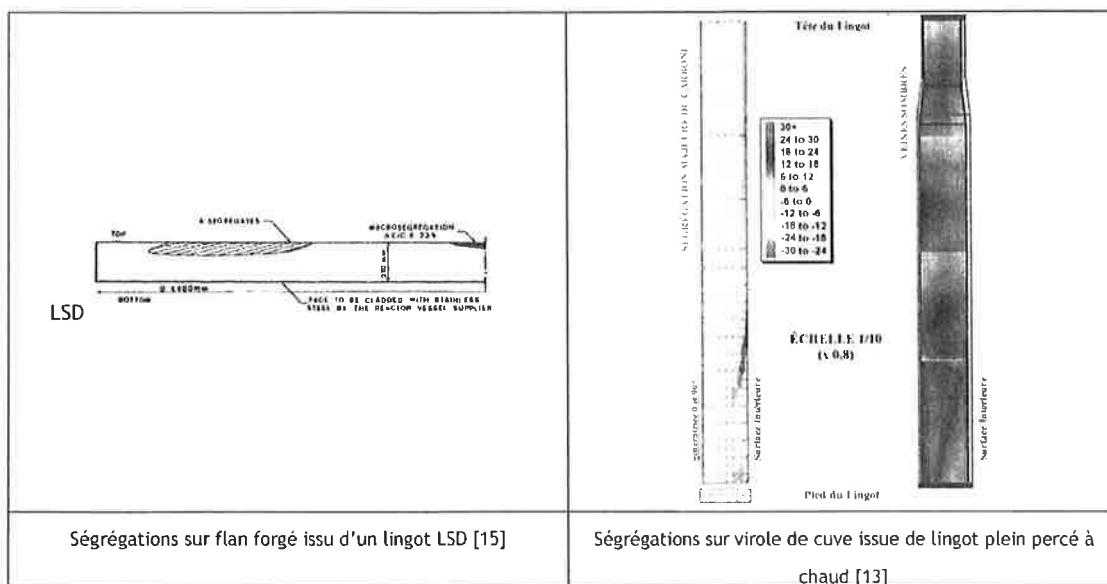


Figure 3 - Niveau des ségrégations ($\Delta C/C$) entre flan forgé et virole de cœur issue de lingot plein

La totalité des résultats obtenus sur le flan expérimental (analyses chimiques, caractéristiques mécaniques) respectaient les exigences requises et avaient montré que les essais de recette restaient représentatifs de l'ensemble de la pièce. Au vu de ces résultats, Framatome avait autorisé le forgeron (Le Creusot Grosse Forge) à commencer la fabrication industrielle de calottes destinées aux cuves des réacteurs du palier 1300 MWe [15].

Dans la suite des évolutions technologiques du parc français, les viroles de cœur des dernières cuves des réacteurs ont été obtenues à partir de lingot creux. Cette technologie permet, dès la coulée du lingot, d'obtenir une ébauche cylindrique creuse, ce qui évite d'avoir recours au perçage à chaud d'un lingot plein qui fait déboucher en peau intérieure des pièces les ségrégations majeures résiduelles, sources de difficultés potentielles lors de la réalisation du revêtement par soudage des viroles. L'utilisation du lingot creux a constitué une amélioration par rapport à l'utilisation d'un lingot plein. Cette amélioration a bénéficié aux viroles des cuves des réacteurs n°2 des centrales de Penly et de Golfech, ainsi qu'à celles des cuves des réacteurs de Chooz et de Civaux.

Ce type de lingot n'a pas pu être utilisé pour la virole porte tubulure avec bride intégrée de la cuve EPR de Flamanville 3 compte tenu des dimensions de cette virole. Le recours à un lingot plein de 525 tonnes a été proposé par le forgeron et ceci a été examiné lors d'une réunion de la section permanente nucléaire (SPN) [17]. Lors de cet examen, le recours à un lingot plein pour une virole de cuve a fait l'objet d'une analyse détaillée et les risques de ségrégations résiduelles en peau intérieure de la virole ont conduit à considérer « *ce choix acceptable sous réserve que l'exploitant démontre que les conséquences de ce procédé sur les propriétés des matériaux soient équivalentes à celles du procédé du lingot creux* ».

L'IRSN souligne que l'utilisation d'un lingot plein pour la virole porte tubulure de l'EPR a bien été identifiée en 2003 comme une différence de fabrication par rapport à la technologie mise en œuvre pour le palier N4 et les risques associés ont conduit à juste titre à définir des modalités de fabrication visant à ne pas dégrader le haut niveau de qualité des pièces par rapport au palier N4.

Pour ce qui concerne les calottes de cuve de l'EPR Flamanville 3, l'IRSN note que le lingot de type 2550 utilisé est le lingot utilisé par le passé pour les viroles de cuve des réacteurs du palier 1300 MWe [16], dont la gamme de forgeage est schématisée en annexe (Tableau A2). L'IRSN souligne que le procédé de fabrication utilisé pour les viroles de cuve 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. **A cet égard, l'IRSN constate qu'une évolution notable de technologie de fabrication entre les calottes pour le palier N4 et celles pour le réacteur FA3 a été adoptée sans la qualification préalable requise par le RCCM ou par les règles techniques applicables au projet EPR [18].**

L'IRSN n'identifie pas les raisons ayant conduit les acteurs impliqués à ne pas avoir réalisé, en préalable à la fabrication des calottes de la cuve du réacteur FA3, une analyse comparative des technologies retenues pour le palier N4 et pour le réacteur FA3, afin d'évaluer les effets métallurgiques potentiels qui en résulteraient sur les pièces de la cuve de FA3 et de définir, en conséquence, les dispositions ou optimisations nécessaires pour garantir un haut niveau de qualité de réalisation de ces pièces. Pour des pièces constitutives d'un composant en exclusion de rupture, l'IRSN considère que cette analyse comparative constitue une des étapes indispensables qui relève de l'attitude interrogative et de la démarche prudente et rigoureuse attendues au titre de la culture de sûreté [19]. **Les raisons qui ont conduit à la situation actuelle des calottes de la cuve FA3 doivent être identifiées et les enseignements doivent en être tirés.**

Il en résulte la présence d'une ségrégation majeure positive atteignant 50 % sur les calottes de la cuve du réacteur FA3, valeur très supérieure à celles des mêmes types de pièces des réacteurs du parc en exploitation (maximum de 20 % à 25 %).

En conclusion, la cuve du réacteur FA3 est la seule des 59 cuves du parc français équipée d'un fond forgé issu d'un lingot conventionnel et présentant une zone de ségrégation majeure positive avec un $\Delta C/C$ de l'ordre de 50 % en peau extérieure.

L'IRSN estime que la technologie de fabrication retenue pour les calottes de cuve du réacteur FA3 est en régression technique par rapport à celles utilisées pour le parc en exploitation. Elle a conduit par ailleurs à s'écarter du domaine couvert par les nombreux essais mécaniques disponibles pour les aciers des cuves des réacteurs français existants.

3 CARACTERISATIONS SUR CALOTTES

3.1 CARACTERISATIONS REALISEES

En 2012, dans le cadre de la justification de la conformité des calottes du couvercle et du fond de cuve du réacteur FA3 au regard des exigences de l'arrêté ESPN de 12 décembre 2005, des essais mécaniques ont été demandés au fabricant. Ces essais [3] ont été menés, en 2014, sur une carotte prélevée au centre d'une calotte de couvercle (calotte dite UA⁽³⁾) considérée représentative des calottes forgées supérieures et inférieures de FA3. Ces essais ont montré, sur cette carotte prélevée au centre de la pièce, des valeurs de résilience à 0°C inférieures à celles mesurées en périphérie lors de la recette et ne respectant le critère du point 4 de l'annexe 1 de l'arrêté précité (résiliences à 0°C inférieures à 60J) (cf. Tableau 4).

Tableau 4 - Valeurs de résilience obtenues à 0°C sur la calotte supérieure UA

			Valeurs individuelles (J)	Moyenne (J)	Critères	
					RCCM	Arrêté ESPN
Essais sur la carotte prélevée au centre du couvercle de cuve UA	Peau supérieure (tête)		70 - 76 - 73	73		Moyenne ≥ 60J
	¼ épaisseur supérieure	1 ^{er} essais	36 - 52 - 48	46		
		contre-essais	47 - 62 - 64	58		
	¼ épaisseur inférieure		114 - 154 - 140	136		
	Peau inférieure (pied)		161 - 171 - 202	178		
Recette réalisée en périphérie du couvercle de cuve UA [4]	1/4 épaisseur, côté pied, en périphérie	Coupon AT1	243 - 227 - 238	236	Moy ≥ 80J Ind ≥ 60 J	
		Coupon AT2	247 - 238 - 237	241		

⁽³⁾ Calotte destinée initialement à un contrat pour les USA

L'origine des résultats de résilience non conformes aux critères a été recherchée et des dosages de carbone ont été réalisés. Ces dosages ont montré que des ségrégations majeures positives en partie centrale de la calotte supérieure étaient à l'origine des faibles valeurs de résilience mesurées. La zone de ségrégation majeure positive est légèrement décentrée par rapport au sommet de la calotte ; elle s'étend sur un diamètre de 1,2 m, comme le montre la figure ci-dessous.

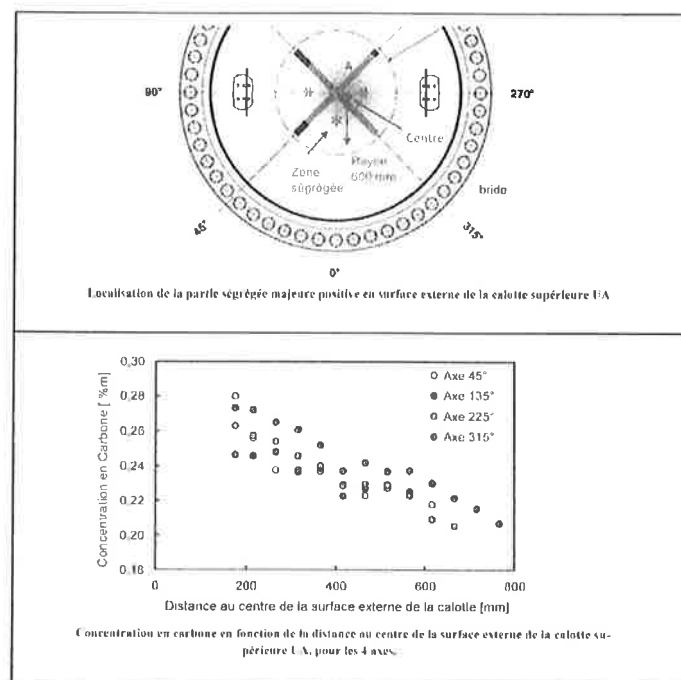


Figure 4 - Morphologie de la zone de ségrégation observée sur la calotte supérieure UA (C = 0,18% à la coulée)

Des mesures par spectrométrie par étincelage ont été faites en 2015 sur la calotte de fond de cuve et de couvercle du réacteur FA3 [6][7]. Les résultats sont synthétisés sur la figure 5 ci-après et montrent qu'une zone de ségrégation majeure positive similaire est aussi présente sur ces calottes.

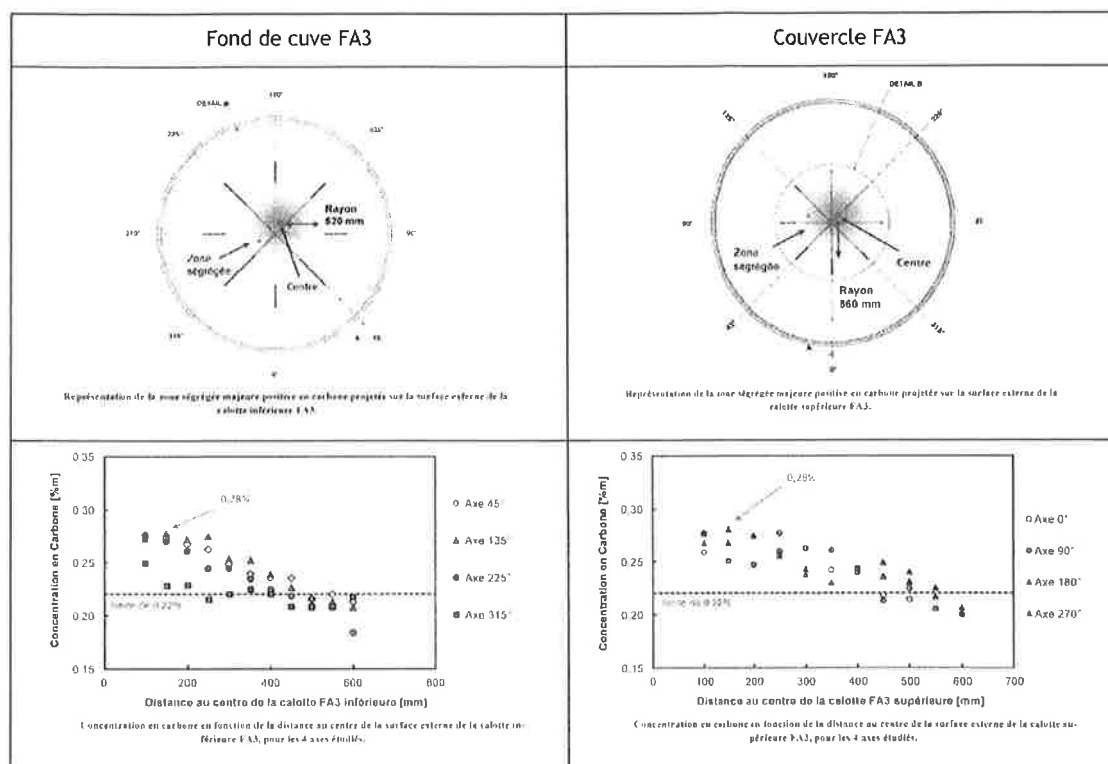


Figure 5 - Zone de ségrégation sur les calottes de fond et de couvercle FA3

Analyse de l'IRSN

Les zones de ségrégation sur la calotte de fond de cuve et sur le couvercle du réacteur FA3 ont été mises en évidence en 2015 grâce à une méthode non destructive d'analyse chimique. Pour l'IRSN, cette méthode était utilisable pour vérifier, au moment de la fabrication, les conséquences potentielles du changement de technologie adoptée pour les calottes de cuve du réacteur FA3.

L'IRSN a noté, lors de son évaluation, que des analyses chimiques (références [1] et [2]) avaient été faites sur des copeaux pour vérifier le bon positionnement de la face tête et de la face pied de l'ébauche forgée en préalable à son emboutissage. Ces dosages avaient montré une valeur de la teneur en carbone de 0,265 % au centre de la calotte de couvercle côté tête de lingot et de 0,277 % à 400 mm du centre, ce qui montrait, pour une teneur de 0,180 % mesurée à la coulée, une ségrégation majeure positive voisine de 50 % ($\Delta C/C$). Le résultat de ces analyses chimiques n'a néanmoins pas conduit à s'interroger lors de la fabrication sur l'origine et les conséquences potentielles de la présence de cette ségrégation positive sur une calotte de couvercle au regard des exigences associées à ces pièces.

L'étendue en surface des zones de ségrégation majeure positive a pu être quantifiée sur les calottes de cuve du réacteur FA3. Leur profondeur exacte reste à caractériser. Cependant, l'IRSN estime, sur la base des valeurs basses de résilience constatées sur la calotte UA, que la zone de ségrégation devrait atteindre un quart de l'épaisseur côté tête de lingot ; l'usinage plus important pour la calotte de fond de cuve (épaisseur finale de 145 mm pour une épaisseur de flan après emboutissage de 330 mm) ne devrait pas conduire à une diminution significative de l'étendue en surface de la zone de ségrégation. Aussi, l'IRSN estime que ces ségrégations ne se limitent vraisemblablement pas à des zones superficielles, et ceci quelle que soit la calotte.

En conclusion, les zones de ségrégations positives présentes sur les calottes de cuve du réacteur FA3 sont liées au procédé de fabrication et conduisent à des valeurs de résilience à 0°C non conformes aux valeurs définies par l'ancienne réglementation (56J en moyenne dans l'arrêté de 1974), à des teneurs en carbone non conformes aux prescriptions du RCCM (0,22 % maximum sur pièce) et à des valeurs de résilience à 0°C également non conformes tant aux prescriptions des règles techniques applicables au projet EPR qu'à l'arrêté ESPN de 2005 (60J).

Compte tenu de ces résultats, et contrairement aux conclusions sans réserve du dossier de qualification du fabricant [1][2], l'IRSN estime que le procédé de fabrication des calottes de cuve du réacteur FA3 n'est pas qualifié.

3.2 CARACTERISATIONS COMPLEMENTAIRES PROPOSEES

Le fabricant propose un programme d'essais complémentaires sur une calotte sacrificielle. Afin d'identifier la pièce sur laquelle sera mené ce programme, une analyse des conditions de fabrication des différentes pièces encore disponibles et fabriquées par le même forgeron a été réalisée.

3.2.1 SELECTION D'UNE PIECE

Le fabricant a indiqué que les calottes inférieures et supérieures des contrats UK et UA ont été réalisées selon des conditions similaires à celles de la cuve du réacteur FA3 : les conditions de fabrication de ces différentes calottes, issues de la référence [4], sont présentées dans les tableaux A3 et A4 en annexe.

Le fabricant propose, après analyse des résultats des analyses chimiques et des caractéristiques mécaniques obtenues à la recette des différentes calottes ainsi que des fiches de non conformités relevées en fabrication, de retenir la calotte supérieure du contrat UK. Le fabricant mentionne en particulier en référence [4] : « L'analyse des différents paramètres pouvant influencer sur la qualité finale des pièces montre que les 3 calottes supérieures et inférieures des 3 contrats sont similaires, et que les procédés de fabrication sont stables et reproductibles.

Les analyses chimiques réalisées à la coulée ou sur pièces ne montrent pas d'écart influant qui pourraient différencier une calotte d'une autre. Sur UK, les 2 calottes ont montré des hors cotes en Mn à la coulée. Cependant, les analyses sur produits de toutes les calottes sont homogènes et ne montrent pas non plus de différence significative.

Différents paramètres de la fabrication (TTQ ou chimie par exemple) ont été analysés pour étudier l'influence de chacun d'entre eux sur les propriétés finales de la pièce. Il est ainsi démontré que les variations relevées sur les différentes pièces ne permettent pas de différencier les pièces entre elles.

Les résultats d'essais mécaniques sur les différentes calottes, aussi bien résultats en traction qu'en résilience, ne montrent pas non plus de différence significative entre les différentes pièces. Les propriétés de traction obtenues sont bien supérieures aux propriétés requises. Les propriétés de résiliences sont quant à elles également comparables entre elles même si les valeurs obtenues sur UK sont légèrement plus basses que sur les autres contrats tout en restant supérieures à 150 J.

Enfin, l'analyse des fiches d'écart ne révèle pas d'écart particulier qui pourrait remettre en cause la représentativité des pièces entre elles.

Compte tenu des éléments décrits dans cette note, il apparaît donc opportun que la pièce devant faire l'objet d'une dissection soit une calotte supérieure, considérant que :

- *il n'apparaît pas de différence significative entre pièces d'un même type en termes de :*
 - *Gamme de fabrication, prévue et réalisée,*
 - *Valeur de Paramètres Essentiels,*
 - *Résultats d'analyses chimiques et d'essais mécaniques,*
- *les calottes inférieures ont la même gamme de fabrication, du lingot jusqu'à l'ébauchage pour TTQ, que les calottes supérieures,*
- *les calottes supérieures présentent une épaisseur supérieure à celle des calottes inférieures lors de la mise en œuvre du TTQ, 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.*

Sachant par ailleurs qu'il n'y a pas d'éléments métallurgiques prépondérants permettant de définir le choix d'une des calottes supérieures, l'option retenue est de procéder à la dissection de la calotte supérieure du contrat UK. »

3.2.2 PROGRAMME D'ESSAIS SUR CALOTTE SACRIFICIELLE

Sur la calotte supérieure UK, le fabricant propose un programme d'investigations dans l'objectif de :

- *« déterminer avec exactitude l'étendue de la zone de ségrégation majeure positive par réalisation de dosage de carbone en surface et dans l'épaisseur de la pièce,*
- *vérifier les caractéristiques mécaniques du matériau dans la zone centrale de la calotte au droit de la ségrégation maximale, en particulier celles associées au risque de rupture brutale. »*

La phase de découpage pour analyses chimiques en vue de la caractérisation de la zone de ségrégation majeure positive fait l'objet de la référence [20] et est synthétisée ci-après :

- *une première analyse chimique sera réalisée en surface de la calotte de manière à déterminer la position du centre de la zone de ségrégation et son étendue (rayon de la zone où la concentration de carbone est supérieure ou égale à 0,25 %, soit un $\Delta C/C \geq 30$ %) ;*
- *la calotte sera alors usinée dans sa partie centrale sur un diamètre de 2500 mm à partir de son centre géométrique (voir figure 6 ci-dessous) ;*

- la partie centrale sera ensuite découpée en deux parties selon l'axe passant par le centre géométrique de la calotte et le centre de la ségrégation.

Sur les différentes surfaces de découpe, des analyses chimiques seront réalisées afin de déterminer la distribution de la concentration de carbone dans l'épaisseur. Au centre de la ségrégation, la grille des points de mesure sera affinée afin de bien appréhender les variations de concentration de carbone dans l'épaisseur de la calotte.

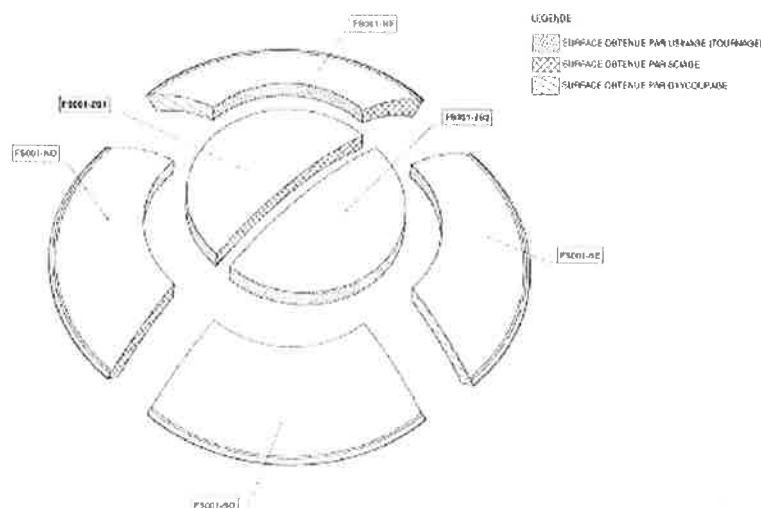


Figure 6 - Schéma de découpe de la calotte.

AREVA a prévu de découper la carotte centrale de 2500 mm de diamètre pour y prélever un certain nombre d'éprouvettes : celles-ci seront prises à différentes épaisseurs comme indiqué sur la figure 7 ci-dessous. Le plan de découpe présenté en référence [8] permet la réalisation de 2 éprouvettes CT25, 10 éprouvettes CT12.5, 3 éprouvettes de résilience et 3 éprouvettes de traction par épaisseur considérée. Une tranche diamétrale est préservée pour réaliser des analyses chimiques.

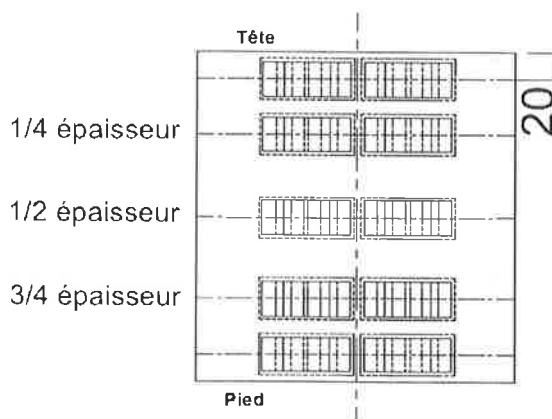


Figure 7 - Schéma de prélèvement d'éprouvettes dans l'épaisseur de la zone cylindrique centrale Ø 2500 mm.

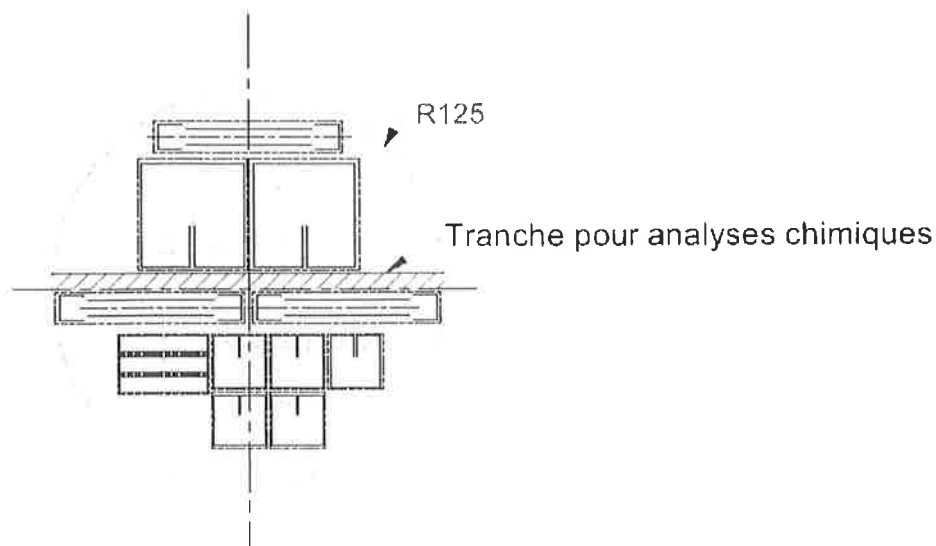


Figure 8 - Schéma de prélèvement d'éprouvettes dans la zone cylindrique centrale Ø 2500 mm.

3.2.3 ANALYSE DE L'IRSN

L'IRSN estime recevables les éléments apportés par AREVA qui conduisent à retenir la calotte supérieure UK comme pièce sacrificielle représentative des calottes FA3. L'IRSN considère toutefois que, compte tenu du taux de ségrégation dans les autres calottes réalisées (UA, UK), celles-ci seraient également exploitables à des fins d'essais.

Le programme proposé par l'exploitant vise à déterminer, dans un premier temps, la zone de ségrégation majeure positive maximale. Après examen, l'IRSN considère que le programme de découpe, qui vise à déterminer la zone de ségrégation maximale, est pertinent et que les analyses chimiques proposées sur les faces découpées ainsi que sur la tranche diamétrale de la carotte prélevée sont effectivement de nature à mieux appréhender la répartition de la ségrégation majeure positive dans le volume de la calotte. En outre, le programme initial de découpe d'éprouvettes apparaît optimisé compte tenu du volume de matière disponible et des types d'essais envisagés par le fabricant.

Néanmoins, compte tenu du volume limité de la zone ségrégée, le nombre d'éprouvettes sera très réduit, notamment pour des essais de ténacité qui présentent une dispersion importante. A cet égard, l'IRSN rappelle que de très nombreux essais et tests, dont certains remontent à plus de 30 ans, ont été réalisés pour définir les caractéristiques mécaniques des aciers faiblement alliés. A titre d'illustration, le tableau A5 en annexe rappelle une des tables de références sur lesquelles repose la partie matériau des dossiers de référence réglementaires du CPP-CSP qui couvre des valeurs de ségrégation allant jusqu'à des $\Delta C/C$ de l'ordre de 25 % pour les aciers de cuve. À la connaissance de l'IRSN, il n'existe pas d'essais concernant le comportement d'un acier de cuve, notamment en termes de propriétés de ténacité, avec un niveau de ségrégation majeure positive de l'ordre de grandeur de celui constaté pour les calottes de cuve du réacteur FA3.

Pour l'IRSN, le programme prévu par le fabricant n'apparaît pas de nature, compte tenu du nombre d'essais prévus et du volume utile de matière disponible pour réaliser des éprouvettes, à apporter des garanties équivalentes à celles provenant des très nombreux résultats issus des essais mécaniques réalisés pour les aciers des cuves des réacteurs du parc.

AREVA doit transmettre prochainement des éléments complémentaires concernant le programme d'essais (tenant compte en particulier des observations de l'ASN et l'IRSN lors de la réunion technique du 18 février 2015, notamment pour ce qui concerne la nécessité de déterminer la température de transition ductile-fragile (RT_{NDT}) de la zone ségréguée) et la démarche retenue pour justifier le caractère suffisant de la ténacité du matériau des calottes de cette cuve ; ils feront l'objet d'un avis ultérieur de l'IRSN.

4 CONCLUSIONS DE L'IRSN

En 2012, dans le cadre de la justification de la conformité des calottes du couvercle et du fond de cuve du réacteur FA3 aux exigences de l'arrêté ESPN de 12 décembre 2005, des essais mécaniques ont été demandés au fabricant. Ces essais, menés en 2014 sur une carotte prélevée au centre d'une calotte de couvercle considérée représentative des calottes de FA3, ont montré des valeurs de résilience à 0°C, d'une part inférieures à celles mesurées en périphérie lors de la recette de la pièce, d'autre part ne respectant pas le critère portant sur la résilience définie dans l'arrêté ESPN. Les analyses menées ont montré que des ségrégations majeures positives de carbone en partie centrale de la calotte supérieure UA étaient à l'origine de ces résultats. Suite à ce constat, AREVA a réalisé des mesures par spectrométrie par étincelage en 2015 sur la calotte de fond de cuve et de couvercle du réacteur FA3, qui indiquent qu'une zone de ségrégation majeure positive similaire est présente sur ces calottes.

La présence de ces ségrégations découle du procédé de fabrication des calottes retenu par Creusot Forge, à partir de lingots de fort tonnage. Ce procédé diffère de ceux employés pour les calottes des cuves des réacteurs du parc en exploitation. A cet égard, l'IRSN observe qu'une évolution notable de technologie de fabrication a été adoptée sans la qualification préalable requise par le RCCM et les règles techniques applicables au projet EPR. De plus, les résultats d'analyses chimiques effectuées au cours de la fabrication, qui avaient montré d'importantes ségrégations majeures positives au centre de la calotte de couvercle du réacteur EPR de Flamanville, n'avaient pas conduit alors à s'interroger sur l'origine et les conséquences potentielles de cette ségrégation.

Les derniers examens réalisés par spectrométrie par étincelage montrent que les calottes de la cuve du réacteur FA3 issues d'un lingot conventionnel présentent des zones de ségrégation majeure positive avec un $\Delta C/C$ de l'ordre de 50 % en peau extérieure, valeur très supérieure à celles des mêmes types de pièces des réacteurs du parc en exploitation (maximum de 20 % à 25 %). L'IRSN retient que l'évolution de la technologie de fabrication qui a été mise en œuvre a conduit à s'écarter du domaine couvert par les nombreux essais mécaniques disponibles pour les aciers des cuves des réacteurs français existants.

Les raisons qui ont conduit à cette situation doivent être identifiées et les enseignements doivent en être tirés.

Compte tenu des résultats d'essais sur la carotte présentant des valeurs de résilience inférieures au critère, AREVA propose la réalisation d'essais complémentaires sur la calotte supérieure de la cuve initialement destinée au réacteur EPR Hinkley Point C (dite calotte UK), pièce jugée représentative des calottes du réacteur FA3. L'objectif de ces essais est de justifier, malgré des valeurs de résilience non conformes au critère réglementaire, le caractère suffisant de la ténacité du matériau des calottes de cette cuve.

Les premiers éléments transmis qui font l'objet de la présente fiche technique concernent le choix de la pièce sélectionnée pour réaliser des essais de ténacité sur une pièce sacrificielle, représentative des calottes inférieure et supérieure de la cuve, et le programme de découpe de cette pièce. AREVA doit transmettre prochainement des éléments complémentaires concernant le programme d'essais et la démarche retenue pour justifier le caractère suffisant de la ténacité du matériau des calottes de cette cuve ; ils feront l'objet d'un avis ultérieur de l'IRSN.

L'IRSN estime que les éléments apportés par AREVA qui conduisent à retenir la calotte supérieure UK comme pièce sacrificielle représentative des calottes de cuve du réacteur FA3 sont convenables. Toutefois, compte tenu du taux de ségrégation dans les autres calottes réalisées (UA, UK), celles-ci seraient également exploitables à des fins d'essais.

L'IRSN considère que le programme de découpe de la calotte UK, qui vise à déterminer la zone de ségrégation maximale, est pertinent et que les analyses proposées sont de nature à mieux appréhender la répartition de la ségrégation majeure positive dans le volume de cette calotte. Néanmoins, compte tenu du volume limité de la zone ségrégée, le nombre d'éprouvettes sera très réduit, notamment pour des essais de ténacité qui présentent usuellement une dispersion importante. A cet égard, l'IRSN estime que le programme d'essais prévu par AREVA n'apparaît pas de nature à apporter des garanties équivalentes à celles provenant des très nombreux résultats issus des essais mécaniques réalisés pour les aciers des cuves des réacteurs du parc.

ANNEXE

Liste des TABLEAUX et FIGURES

TABLEAUX :

- Tableau A1 - Comparaison des gammes de forgeage des calottes inférieure et supérieure FA3.
- Tableau A2 - Gamme de forgeage de la virole de cuve 1300 MWe.
- Tableau A3 - Comparaison des PTF des calottes supérieures FA3 - UA - UK.
- Tableau A4 - Comparaison des PTF des calottes inférieures FA3 - UA - UK.
- Tableau A5 - Exemples de références du DRR - LOT3 Matériaux.

FIGURES :

- Figure A1 - Schéma Cuve EPR
- Figure A2 - Schéma Cuve N4

GAMME DE FORGE VIROLE C2 Q3

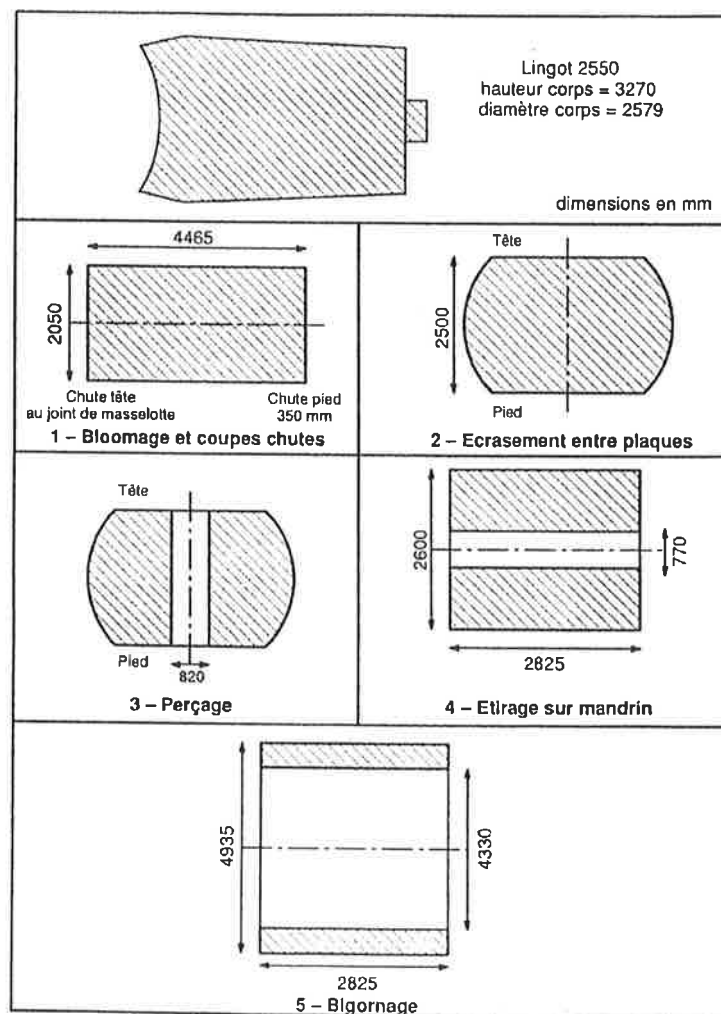


Tableau A2 - Gamme de forgeage de la virole de cuve 1300 MWe

	Calotte Supérieure		
	FA3 (PTF 131 rev G)	UA (PTF 240 rev D)	UK (PTF 335 rev J)
type lingot	type 2550	type 2550	type 2550
poids lingot	156,9 t (156,9 t)	156,9 t (156,9 t)	156,9 t (156,9 t)
Gamme de forgeage	Bloomage Chutage écrasement entre plaques écrasement en passes parallèles	Bloomage Chutage écrasement entre plaques écrasement en passes parallèles	Bloomage Chutage écrasement entre plaques écrasement en passes parallèles
corroyage	12,8	12,9	12,9
chutage	tête : 19,7% (20%) pied : 8,5% (9%)	tête : 19,7% (19,7 %) pied : 8,5% (8,5%)	tête : 18,2% (18,2%) pied : 10% (10%)
Teneur en Hydrogène	0,95 ppm	0,94 ppm	0,54 ppm
TTP après forgeage deshydrogénation	200/250°C 9h mini (230/250°C 10h05) 625/675°C 96h** mini (625/673°C 98h35)	200/250°C 9h mini (220/250°C 10h10) 625/675°C 96h** mini (625/650°C 98h00)	200/250°C 9h mini (226/250°C 10h30) 625/675°C 56h** mini (625/652°C 57h12)
TTP après forgeage normalisation	900/980°C 9h à 12h (925/960°C 10h32)	900/980°C 9h à 12h (935/954°C 10h12)	900/980°C 9h à 12h (915/941°C 11h41)
TTP après forgeage revenu	615/665°C 9h mini (615/650°C 10h36)	615/665°C 9h mini (615/646°C 10h57)	615/685°C 9h mini (615/645°C 10h35)
dim flan avant emboutissage	Ø 5340 - ep 330	Ø 5340 - ep 330	Ø 5340 - ep 330
ébauchage en usinage pour le TTQ	ep 290 mm	ep 290 mm	ep 290 mm
TTQ après emboutissage première austénitisation	860/890°C 6h à 10h30 (860/876°C 7h26)	860/890°C 6h à 10h30 (860/880°C 8h09)	860/890°C 6h à 10h30 (860/876°C 7h04)
TTQ après emboutissage dernière austénitisation	860/890°C 6h à 10h30 (860/880°C 7h36)	860/890°C 6h à 10h30 (860/880°C 7h25)	860/890°C 6h à 10h30 (860/879°C 7h13)
Temps de transfert entre le four et la bache de trempe	7 minutes	5 minutes	6 minutes
TTQ après emboutissage revenu	630/660°C 6h à 10h30 (630/646°C 7h42)	635/660°C 6h à 10h30 (635/652°C 6h56)	630/660°C 6h à 10h30 (630/654°C 7h12)
%C sur produit : copeaux usinage flan	Tête : 0,27% Pied : 0,17%	Tête : 0,21% * Pied : 0,19%	Tête : 0,25% Pied : 0,19%

Comparaison des PTF des calottes supérieures.

Valeur entre parenthèses : réalisée en fabrication.

* prélèvement de copeaux décarburés (voir note DJ 12 0119 rev B)

** temps mini de la durée défini par la teneur en hydrogène déterminée sur produit.

Tableau A3 - Comparaison des PTF des calottes supérieures FA3 - UA - UK

	Calotte Inférieure		
	FA3 (PTF 134 rev E)	UA (PTF 242 rev F)	UK (PTF 336 rev J)
type lingot	type 2550	type 2550	type 2550
poids lingot	156,9 t (156,9 t)	156,9 t (156,9 t)	156,9 t (156,9 t)
Gamme de forgeage	Bloomage Chutage écrasement entre plaques écrasement en passes parallèles	Bloomage Chutage écrasement entre plaques écrasement en passes parallèles	Bloomage Chutage écrasement entre plaques écrasement en passes parallèles
corroyage	12,8	12,9	12,9
chutage	tête : 19,7% (20%) pied : 8,5% (8%)	tête : 19,7% (19,7%) pied : 8,5% (8,5%)	tête : 18,2% (18,2%) pied : 10% (10%)
Teneur en Hydrogène	0,95 ppm	0,6 ppm	0,62 ppm
TTP après forgeage deshydrogénation	200/250°C 9h mini (230/250°C 10h45) 625/675°C 96h** mini (625/673°C 97h32)	200/250°C 9h mini (230/250°C 11h28)	200/250°C 9h mini (229/250°C 10h19) 625/675°C 96h** mini (625/657°C 129h37)
TTP après forgeage normalisation	900/980°C 9h à 12h (925/948°C 11h10)	900/980°C 9h à 12h (925/946°C 10h12)	900/980°C 9h à 12h (900/947°C 11h35)
TTP après forgeage revenu	615/665°C 9h mini (615/640°C 10h20)	615/665°C 9h mini (615/650°C 10h35)	615/665°C 9h mini (615/639°C 10h59)
dim flan avant emboutissage	Ø 5340 - ep 330	Ø 5340 - ep 330	Ø 5340 - ep 330
ébauchage en usinage pour le TTQ	ep 250 mm	ep 250 mm	ep 250 mm
TTQ après emboutissage première austénitisation	860/690°C 5h à 9h (860/876°C 7h40)	860/890°C 5h à 9h (860/875°C 7h40)	860/890°C 6h à 10h30 (865/880°C 7h22)
TTQ après emboutissage dernière austénitisation	860/690°C 5h à 9h (860/875°C 8h17)	860/890°C 5h à 9h (860/875°C 7h10)	860/890°C 6h à 10h30 (865/875°C 7h15)
Temps de transfert entre le four et la bache de trempe	5 minutes	5 minutes	4 minutes
TTQ après emboutissage revenu	630/660°C 5h à 9h (630/650°C 6h46)	635/660°C 5h à 9h (635/651°C 7h51)	630/660°C 6h à 10h30 (630/648°C 7h14)
%C sur produit : copeaux usinage flan	Tête : 0,19% * Pied : 0,16%	Tête : 0,20% * Pied : 0,18%	Tête : 0,27% Pied : 0,18%

Comparaison des PTF des calottes inférieures.

Valeur entre parenthèses : réalisée en fabrication.

* prélèvement de copeaux décarburés (voir note DJ 12 0119 rev B)

** temps mini de la durée défini par la teneur en hydrogène déterminée sur produit.

Tableau A4 - Comparaison des PTF des calottes inférieures FA3 - UA - UK

Section 2.2 : Métallurgie, fabrication (aciers forgés et tôles)

Chapitre	Section	Désignation matériau	Référence	Indice	Date	Titre	CP0	CP1	CP2	P4	P4	N4
2	2.2.1	Aciers Faiblement Alliés - aciers forgés et tôles	TEMDC022	D	mars-76	DOSSIER GENERAL DES MATERIAUX - Aciers forgés et laminés faiblement alliés Mn Ni Mo - SA 533 Gr B C12-SA 508 C13 Rm : 620 MPa						
			EESDC551	C	ma-97	RUPTURE BRUTALE CSP N4 - Lois de comportement en traction à chaud et ténacité des aciers faiblement alliés et joints soudés du secondaire des générateurs de vapeur						
			EEMDC674	A	dec-87	EFFET DES CONDITIONS DE SERVICE SUR LA RESISTANCE A LA DECHIRURE DE L'ACIER 15MND5 A TENEUR EN SOUFRE DE 0.014% - PWS 3 72						
			TEM75161	I	févr-77	DOSSIER GENERAL DES MATERIAUX - Aciers forgés et laminés faiblement alliés Mn Ni Mo-SA 508 C13 SA 533 Gr B C11						
			TEMDC511	A	mars-80	Analyses comparées des programmes de fabrication des grosses pièces de forge (Cuve et GV)						
			TEMDC589	B	juin-80	Ténacité des tubulures de cuve SA 508 C1 3						
			Creusot - Loire		janv-84	Rapport de Qualification Virole C - Lingot Creux						
			Creusot - Loire		avr-84	Rapport de Qualification Virole B - Lingot Creux						
			Publication University of Sheffield, UK		sept-85	Application of directional solidification ingot (LSD) in forging of PWR reactor vessel heads						
			EETDC110	A	oct-85	Etude comparative des résultats des essais de qualification des viroles B de cuve réalisées à partir de lingots creux par Kawasaki et Grosse Forge						
			Publication Revue de Métallurgie		mai-86	Analyse quantitative carbone/phosphore à la microsonde électronique (EPMA)						
			Publication Baerentzen H. Norway		juin-86	Microsegregation measurements - methods and application to heavy forging ingots						
			EESDC155	C	dec-92	DOSSIER RUPTURE BRUTALE CPP 1300 MWe - Ténacité et comportement en traction à chaud des aciers faiblement alliés pour les paliers P4 et P4				X	X	
			EESDC590	A	sept-95	AMELIORATION DE LA CONNAISSANCE STATISTIQUE DES CARACTERISTIQUES MECANQUES DES MATERIAUX DES R E P - Recueil et analyse des données des aciers faiblement alliés, métal de base et joints soudés						
			EESDC587	A	dec-95	AMELIORATION DE LA CONNAISSANCE STATISTIQUE DES CARACTERISTIQUES MECANQUES DES MATERIAUX DES R E P - Données d'étude pour l'estimation de la ténacité des aciers Mn-Ni-Mo et C-Mn						
			EESDC642	B	sept-96	Etude des gammes de fabrication des viroles de coeur de cuves						
			EESDC659	B	oct-96	Reévaluation des marges à rupture des cuves 500 MWe - Evolution de la composition chimique dans l'épaisseur des viroles de coeur						
			EESDC661	B	oct-96	Reévaluation des marges à rupture des cuves 500 MWe - Effet de trempe dans l'épaisseur des viroles de coeur						
			EESDC548	D	juin-97	DOSSIER RUPTURE BRUTALE CPP N4 - Lois de comportement en traction à chaud et ténacité des aciers faiblement alliés						X
			Publication Pusan Korea		oct-97	Improving the knowledge of the metallurgical features of large forgings by optimizing the experimental test programme						

Tableau A5 - Exemples de références du DRR - LOT3 Matériaux [13]

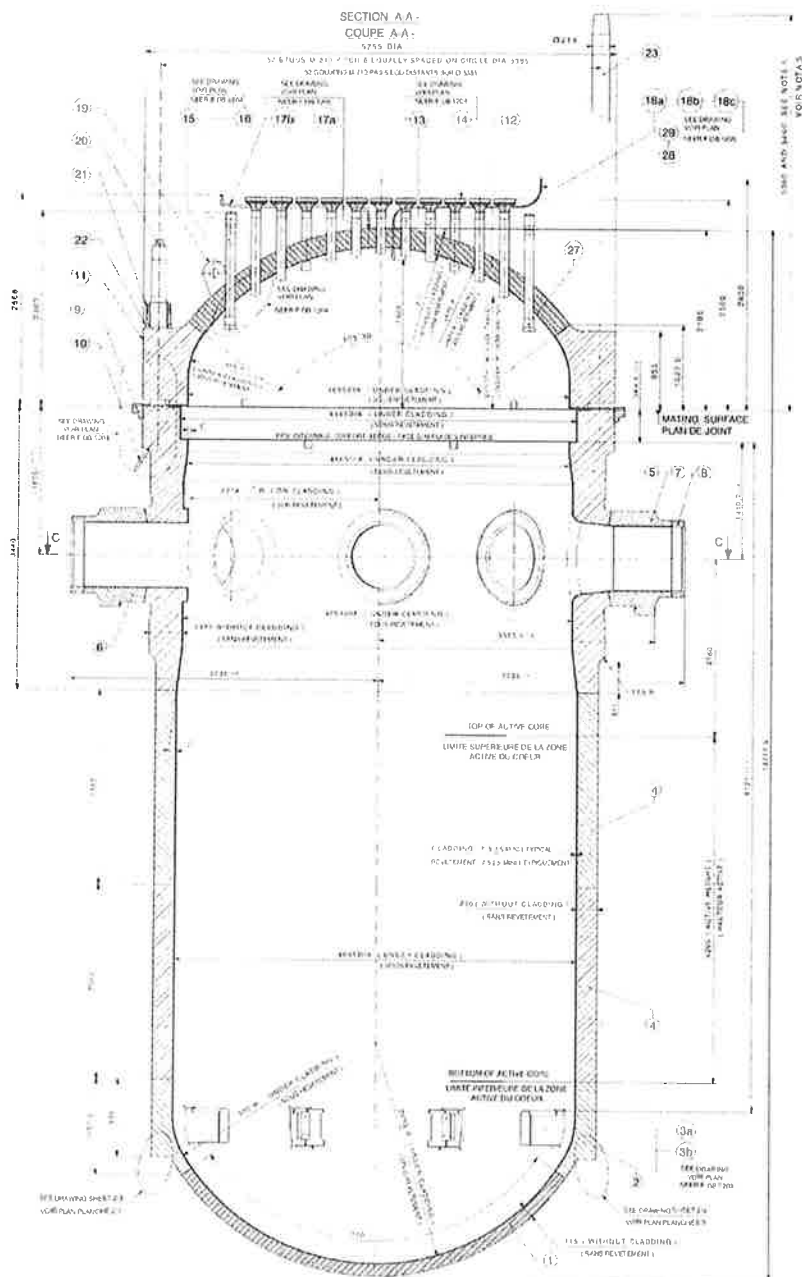


FIGURE A1 - Schéma Cuve EPR

