

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

Rapport ASN référencé CODEP-DEP-2017-019368

Rapport IRSN/2017-00011

Version publique



Séance des 26 et 27 juin 2017



**Analyse des conséquences de l'anomalie des calottes
de la cuve du réacteur EPR de Flamanville
sur leur aptitude au service**

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
15 juin 2017	SIGNÉ R. CATTEAU	SIGNÉ K. HERVIOU

SOMMAIRE

RÉFÉRENCES	7
SIGLES, ABRÉVIATIONS ET DÉNOMINATIONS	12
1. INTRODUCTION.....	16
2. DÉMARCHE DE JUSTIFICATION	19
2.1. Détection de l'écart et origine technique.....	19
2.2. Principes de la démarche de justification d'Areva NP	21
2.2.1. Modes de dégradation retenus	21
2.2.2. Analyse du risque de rupture dans les domaines fragile et de la transition fragile-ductile.....	22
2.2.2.1. Détermination de la ténacité minimale et des propriétés mécaniques en zone de ségrégation majeure positive.....	23
2.2.2.2. Détermination de la ténacité suffisante pour justifier la prévention du risque de rupture brutale .	24
2.2.2.3. Comparaison de la ténacité minimale à la ténacité suffisante	24
2.2.3. Analyse du risque de rupture dans le domaine ductile	25
2.3. Positions prises par l'ASN depuis 2015	25
2.3.1. Position de l'ASN à la suite de la réunion du GP ESPN du 30 juin 2015	25
2.3.2. Position de l'ASN à la suite de la réunion du GP ESPN du 24 juin 2016	26
3. CONTRÔLES PAR ESSAIS NON DESTRUCTIFS RÉALISÉS LORS DE LA FABRICATION : RECHERCHE DES DÉFAUTS POTENTIELLEMENT PRÉSENTS DANS LE COUVERCLE ET LE FOND DE CUVE.....	27
3.1. Rappel des demandes formulées par l'ASN à la suite des séances du GP ESPN des 30 septembre 2015 et 24 juin 2016.....	27
3.2. Éléments transmis par Areva NP	29
3.2.1. Éléments transmis par Areva NP pour répondre à ses engagements	29
3.2.2. Éléments transmis par Areva NP pour répondre aux demandes formulées par l'ASN.....	30
3.2.2.1. Contrôles de recherche de défauts sous revêtement en peau interne des calottes inférieure et supérieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville.....	30
3.2.2.2. Réalisation d'essais non destructifs en fond de cuve, autres que le ressuage	31
3.3. Position du rapporteur	34
3.3.1. Contrôles réalisés lors de la fabrication	36
3.3.2. Contrôles complémentaires de la surface externe des calottes	36
3.3.3. Contrôles complémentaires de recherche de défauts sous revêtement des calottes	37
4. CARACTÉRISATION DU MATÉRIAU.....	38
4.1. Programme d'essais	38
4.1.1. Programme réalisé par Areva NP	38
4.1.1.1. Contenu du programme d'essais	38
4.1.1.2. Préparation et caractérisation de la matière.....	40
4.1.1.3. Choix des laboratoires d'essais et d'expertises	43

4.1.1.4.	Méthodes de mesure de la teneur en carbone	43
4.1.1.5.	Vieillessement thermique.....	44
4.1.2.	Position du rapporteur	45
4.1.2.1.	Contenu du programme d'essais	45
4.1.2.2.	Choix des laboratoires d'essai.....	46
4.1.2.3.	Évaluation des incertitudes de mesure de la teneur en carbone.....	46
4.1.2.4.	Vieillessement thermique.....	47
4.1.3.	Surveillance du programme d'essais par un organisme mandaté par l'ASN.....	48
4.1.3.1.	Objectifs et modalités de la surveillance	48
4.1.3.2.	Bilan quantitatif de la surveillance	49
4.1.3.3.	Traitement des écarts.....	50
4.1.3.4.	Avis de Bureau Veritas Exploitation	50
4.1.4.	Position du rapporteur sur la mise en œuvre du programme d'essais.....	50
4.2.	Représentativité des calottes sacrificielles par rapport à celles de la cuve du réacteur EPR de Flamanville.....	51
4.2.1.	Principes de la démarche d'Areva NP d'analyse de la représentativité des calottes sacrificielles	51
4.2.2.	Paramètres influençant la teneur en carbone.....	52
4.2.2.1.	Éléments documentaires et évalués par simulation numérique.....	52
4.2.2.2.	Données expérimentales	56
4.2.3.	Paramètres influençant l'effet de trempe.....	58
4.2.3.1.	Éléments documentaires et analytiques	58
4.2.3.2.	Données expérimentales	60
4.2.4.	Études complémentaires réalisées par Areva NP	63
4.2.4.1.	Analyses d'incertitudes et statistiques	63
4.2.4.1.	Comparaison des teneurs en carbone dans la profondeur des calottes sacrificielles	63
4.2.4.2.	Comparaison au bloom de R&D MOPPEC.....	65
4.2.5.	Position du rapporteur sur la justification de la représentativité.....	66
4.3.	Résultats et interprétation du programme d'essais.....	69
4.3.1.	Paramètres influençant les propriétés mécaniques.....	69
4.3.2.	Propriétés en traction	70
4.3.2.1.	En zone de recette	71
4.3.2.2.	En zone ségrégée.....	71
4.3.3.	Propriétés de résilience.....	73
4.3.4.	Températures T_{NDT} et RT_{NDT}	75
4.3.4.1.	En zone de recette	76
4.3.4.2.	En zone ségrégée.....	76
4.3.5.	Ténacité dans le domaine de la transition fragile-ductile.....	78
4.3.5.1.	En zone de recette	80
4.3.5.2.	En zone ségrégée.....	80
4.3.6.	Ténacité dans le domaine ductile	84
4.3.7.	Mécanismes de rupture.....	85
4.3.7.1.	Dans le domaine de la transition fragile-ductile	85
4.3.7.2.	Dans le domaine ductile.....	85
4.3.8.	Position du rapporteur sur les propriétés mécaniques en zone ségrégée	86
4.3.8.1.	Caractère suffisant des connaissances apportées par le programme d'essais	86
4.3.8.2.	Impact de la teneur en carbone sur les propriétés mécaniques du matériau.....	87
4.3.8.3.	Amélioration de la trempabilité liée à la teneur en carbone et effet de trempe.....	88
4.3.8.4.	Mécanisme de rupture en zone ségrégée	89
4.3.8.5.	Conservatisme de la courbe de ténacité ZG6110 du code RCC-M pour définir une ténacité minimale en zone ségrégée.....	90
4.3.8.6.	Ténacité dans le domaine ductile en zone ségrégée.....	91
4.3.9.	Transposition des résultats obtenus sur les calottes sacrificielles aux calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville	91
4.3.9.1.	Dossier d'Areva NP.....	91
4.3.9.2.	Position du rapporteur.....	93

5.	CHARGEMENTS THERMOMÉCANIQUES.....	95
5.1.	Paramètres thermohydrauliques pertinents	96
5.2.	Situations de choc chaud.....	96
5.2.1.	Identification des situations de choc chaud retenues.....	96
5.2.2.	Caractérisation des situations de choc chaud.....	97
5.3.	Situations de choc froid	98
5.3.1.	Identification des situations de choc froid	98
5.3.2.	Caractérisation des situations de choc froid	98
5.4.	Position du rapporteur	100
5.4.1.	Problématiques communes aux situations de choc chaud et de choc froid	100
5.4.2.	Situations de choc chaud	100
5.4.2.1.	Démarche d'identification des situations de choc chaud.....	100
5.4.2.2.	Pertinence de la caractérisation des situations de choc chaud	101
5.4.3.	Situations de choc froid.....	101
5.4.3.1.	Démarche d'identification des situations de choc froid.....	101
5.4.3.2.	Pertinence de la caractérisation des situations de choc froid	102
5.5.	Conclusion du rapporteur.....	105
6.	ANALYSE DU RISQUE DE RUPTURE BRUTALE	107
6.1.	Démarche d'évaluation du risque de rupture brutale	107
6.2.	Défauts postulés	109
6.3.	Méthodes de calcul du facteur d'intensité de contraintes associé à chaque type de défaut	109
6.4.	Chargements limitatifs considérés	110
6.5.	Marges à la rupture dans le domaine de la transition fragile-ductile	111
6.5.1.	Défaut d'une hauteur de 10 mm	111
6.5.2.	Marges pour un défaut conventionnel d'une hauteur de 20 mm	114
6.6.	Position du rapporteur sur l'analyse de risque de rupture brutale.....	114
6.6.1.	Démarche	114
6.6.2.	Ténacité	115
6.6.3.	Méthode de calcul du facteur d'intensité de contraintes	115
6.6.4.	Taille de défaut.....	115
6.6.5.	Chargements retenus	116
6.6.6.	Marges à la rupture.....	116
7.	IMPACT DES IRRÉGULARITÉS DÉTECTÉES AU SEIN DE L'USINE CREUSOT FORGE D'AREVA NP SUR LE TRAITEMENT DE L'ANOMALIE DES CALOTTES DE LA CUVE DU RÉACTEUR EPR DE FLAMANVILLE.....	117
7.1.	Détection des écarts	117
7.2.	Écarts détectés.....	118
7.3.	Position du rapporteur	119
8.	SUIVI EN SERVICE	121

8.1.	Dossier d'Areva NP	121
8.1.1.	Rappel des demandes de l'ASN	121
8.1.2.	Position d'Areva NP	121
8.1.2.1.	Contrôlabilité de la calotte inférieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville.....	122
8.1.2.2.	Contrôlabilité de la calotte supérieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville	123
8.2.	Position du rapporteur	123
8.2.1.	Principe de défense en profondeur et exclusion de rupture	123
8.2.1.1.	Principe de défense en profondeur.....	123
8.2.1.2.	Exclusion de rupture	124
8.2.2.	Conséquences quant à l'aptitude au service des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville ...	125
8.2.2.1.	Analyse du premier niveau de défense en profondeur	125
8.2.2.2.	Renforcement du deuxième niveau de défense en profondeur.....	127
9.	CONCLUSION GÉNÉRALE	133
ANNEXE 1	: TABLEAUX ET FIGURES	138
ANNEXE 2	: SCHÉMAS ET COMPOSANTS DE LA CUVE DU RÉACTEUR EPR DE FLAMANVILLE	143
ANNEXE 3	: SCHÉMA DU CIRCUIT PRIMAIRE ET DES SYSTÈMES CONNECTÉS, NOTAMMENT LE SYSTÈME RIS-RA	144
ANNEXE 4	: ANALYSE DES CHARGEMENTS THERMOMÉCANIQUES - POINTS COMMUNS AUX SITUATIONS THERMOHYDRAULIQUES DE CHOC CHAUD ET DE CHOC FROID	145
ANNEXE 5	: CHARGEMENTS THERMOMÉCANIQUES - CARACTÉRISATION DES TRANSITOIRES DE CHOC CHAUD	149
ANNEXE 6	: CHARGEMENTS THERMOMÉCANIQUES - EXHAUSTIVITÉ ET CARACTÉRISATION DES TRANSITOIRES THERMOHYDRAULIQUES DE CHOC FROID DE 3^E ET 4^E CATÉGORIES	160
ANNEXE 7	: SCÉNARIOS DE REMPLACEMENT DES CALOTTES	165
ANNEXE 8	: GAMMES DE FORGEAGE DES CALOTTES INFÉRIEURE ET SUPÉRIEURE DU RÉACTEUR EPR DE FLAMANVILLE	171
ANNEXE 9	: SYNTHÈSE DES CARTOGRAPHIES DE TENEUR EN CARBONE EN SURFACE DES CALOTTES	172
ANNEXE 10	: SYNTHÈSE DES CARTOGRAPHIES DE TENEUR EN CARBONE DANS L'ÉPAISSEUR	177
ANNEXE 11	: SYNTHÈSE DES CARTOGRAPHIES DE TENEUR EN CARBONE PAR PROFONDEUR	178

ANNEXE 12	: LISTE DES SITUATIONS THERMOHYDRAULIQUES RETENUES DANS LES ANALYSES DE MÉCANIQUE	179
ANNEXE 13	: ÉVOLUTION DE LA TÉNACITÉ ET DU FACTEUR D'INTENSITÉ DE CONTRAINTES EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE...	180
ANNEXE 14	: FACTEURS DE MARGE POUR DES DÉCALAGES DE RT_{NDT} DE 70 °C EN PEAU EXTERNE ET 35 °C EN PEAU INTERNE	181
ANNEXE 15	: RÉPONSES D'AREVA NP AUX DEMANDES DE L'ASN	183

Références

- [1] Directive européenne 2014/68/UE du 15 mai 2014 relative à l'harmonisation des législations des États membres concernant la mise à disposition sur le marché des équipements sous pression (refonte)
- [2] Arrêté du 10 novembre 1999 relatif à la surveillance de l'exploitation du circuit primaire principal et des circuits secondaires principaux des réacteurs nucléaires à eau sous pression
- [3] Arrêté du 12 décembre 2005 remplacé par l'arrêté du 30 décembre 2015 relatif aux équipements sous pression nucléaires, dit « arrêté ESPN »
- [4] Arrêté INB du 7 février 2012 modifié fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base
- [5] Rapport ASN/IRSN référencé CODEP-DEP-2015-037971 - IRSN/2015-00010 - Rapport au Groupe permanent d'experts pour les équipements sous pression nucléaires du 30 septembre 2015 - Analyse de la démarche proposée par Areva NP pour justifier de la ténacité suffisante des calottes du fond et du couvercle de la cuve de l'EPR de Flamanville 3
- [6] Avis et recommandations du GP ESPN du 30 septembre 2015 référencés CODEP-MEA-2015-040055 du 1^{er} octobre 2015
- [7] Courrier de l'ASN à Areva NP référencé CODEP-DEP-2015-043888 du 14 décembre 2015 – Position de l'ASN sur la démarche de justification de la ténacité suffisante des calottes du fond et du couvercle de la cuve de l'EPR de Flamanville
- [8] Note ASN/IRSN CODEP-DEP-2016-019209 - IRSN/2016-00005 – Note de synthèse au Groupe permanent d'experts pour les équipements sous pression nucléaires du 24 juin 2016 - Démarche proposée par Areva NP pour justifier de la ténacité suffisante des calottes du fond et du couvercle de la cuve de l'EPR de Flamanville 3 - Point d'étape
- [9] Observations du GP ESPN du 24 juin 2016 référencées CODEP-MEA-2016-027702 du 7 juillet 2016
- [10] Courrier de l'ASN à Areva NP référencé CODEP-DEP-2016-031435 du 26 septembre 2016 – Point d'étape sur la démarche de justification de la ténacité suffisante des calottes du fond et du couvercle de la cuve de l'EPR de Flamanville
- [11] Note technique d'Areva NP référencée D02-ARV-01-104-503 révision B du 27 avril 2017 – Justification de la ténacité suffisante des calottes du fond et du couvercle de la cuve de l'EPR de Flamanville 3
- [12] Note technique d'Areva référencée NP D02-ARV-01-104-502 révision B du 18 avril 2017 – Éléments de synthèse relatifs à la transposition des résultats obtenus sur les pièces sacrificielles aux calottes de cuve FA3
- [13] Note technique d'Areva NP référencée D02-ARV-01-101-167 révision F du 24 avril 2017 – Synthèse des essais mécaniques du programme sacrificiel calottes de cuve EPR FA3
- [14] Note technique d'Areva NP référencée D02 – DTIMR-F-16-0424 révision B – Calottes de cuve Flamanville 3 – Inspectabilité en service
- [15] Note d'Areva NP référencée D02-PC-16-0003 révision A - Étude du remplacement du couvercle
- [16] Note d'Areva NP référencée D02-PC-16-0004 révision A - Étude de remplacement du fond de cuve
- [17] Note technique d'Areva NP D02-PEE-F-15-0007 du 24 avril 2015 : « Calottes de cuve FA3 – Conception et fabrication »

- [18] Note technique d'Areva NP D02-PEEM-F-15-0368 du 11 mai 2015 : « Démarche de justification du couvercle et du fond de cuve FA3 »
- [19] Courrier de l'ASN référencé CODEP-DEP-2012-046298 du 5 septembre 2012
- [20] Note d'Areva NP référencée PTSI/2013.0076 du 1^{er} février 2013
- [21] Note d'Areva NP référencée TM/QURM-79 7 2054 révision 2 - rapport de qualification de la procédure de recherche de DSR
- [22] Note d'Areva NP référencée 34296 révision 0 du 24 avril 2017 - Démonstration de performance de la thermographie pour la recherche de défauts remplis d'oxydes à la surface externe du fond de cuve FA3
- [23] Note d'Areva NP référencée 33300 du 22 juin 2016 - Dossier de justification technique pour les UT TOFD
- [24] Note d'Areva NP référencée COXSGN/NCR0635 révision L - Procédure de contrôle visuel des indications vues en CPA
- [25] Courrier d'Areva NP référencé ARV-DEP-00630 du 20 janvier 2017
- [26] Courrier d'Areva NP ARV-DEP-00354 du 11 septembre 2015 : « Engagements Areva NP relatifs au projet de rapport au GP ESPN »
- [27] Lettre de l'ASN du 18 mai 2016 référencée CODEP-DEP-2016-018803 – Suite de l'inspection INSSN-DEP-2016-0694 à Erlangen
- [28] Lettre de l'ASN du 24 octobre 2016 référencée CODEP-DEP-2016-040564 – Suite de l'inspection INSSN-DEP-2016-0747 à Saint-Marcel
- [29] Lettre de l'ASN du 30 mai 2017 référencée CODEP-DEP-2017-010832 – Suite de l'inspection INSSN-DEP-2017-0637 à l'usine Creusot Forge d'Areva NP
- [30] Rapport de surveillance de Bureau Veritas Exploitation référencé RF_16-135_2540681_RJA_EC calotte de cuve CODEP-DEP-2012- 052493_Rev00 du 12 février 2016
- [31] Rapport de surveillance de Bureau Veritas Exploitation référencé PV_CB797994_MCF_17-038_Synthese PEC FA3_rev03 du 24 mai 2017
- [32] Note technique d'EDF référencée D309516018651 révision A du 24 août 2016 - Impact potentiel d'un mécanisme de vieillissement en température sur le comportement d'une zone de ségrégation majeure positive des calottes de cuve de Flamanville 3
- [33] Note technique d'EDF référencée D309517011019 A du 27 avril 2017 - Programme sacrificiel calottes de cuve de Flamanville 3 – Programme de vieillissement thermique sur une zone de ségrégation majeure positive
- [34] Note technique d'Areva NP référencée MDHTIM 2015-034 A du 30 juillet 2015 - Normes utilisées dans le cadre du programme sacrificiel
- [35] Note technique d'Areva NP référencée D02-PEEM-F-16-0291 A du 14 juin 2016 - Paramètres influençant la résistance à la rupture fragile des pièces forgées massives en acier faiblement allié
- [36] Note technique d'Areva NP référencée MDHTDM DT 14.028 A du 8 décembre 2014 - Résultat des essais complémentaires réalisés sur une carotte de la calotte UA
- [37] Note technique d'Areva NP référencée D02-ARV-01-102-083 B du 06 février 2017 - Synthèse des observations fractographiques du programme sacrificiel calottes de cuve EPR FA3
- [38] Engineering Fracture Mechanics 73 (2006) 2723–2747
- [39] PVP2014-28076, conférence PVP 2014, Anaheim, USA
- [40] Engineering Fracture Mechanics 73 (2006) 283–295
- [41] Engineering Fracture Mechanics 69 (2002) 451–481
- [42] Article de S. Chapuliot, M.H. Lacire, S. Marie, M. Nédélec, publié en 2005 dans Engineering Fracture Mechanics, pp. 661-673 : « Thermomechanical analysis of

thermal shock fracture in the brittle/ductile transition zone. Part I : description of tests »

- [43] Note d'Areva NP référencée D02-ARV-01-104-034 révision A du 16 décembre 2016 - EPRTM FA3 Calottes de cuve – Note de synthèse des situations de choc chaud pour l'analyse de défauts en peau externe des calottes
- [44] Note d'Areva référencée NP D02-ARV-01-104-034 révision C du 12 juin 2017 - EPRTM FA3 Calottes de cuve – Note de synthèse des situations de choc chaud pour l'analyse de défauts en peau externe des calottes
- [45] Note d'Areva NP référencée NEPRFDC81J du 10 septembre 2015 – Dossier des situations de 2^e catégorie du circuit primaire principal
- [46] Note d'Areva NP référencée NEPRFDC82J du 17 septembre 2015 – Dossier des situations de 3^e et 4^e catégorie du circuit primaire principal
- [47] Lettre d'Areva NP référencée ARV-DEP-00324 du 17 juillet 2015 – FA3 – Calottes de cuve – Réponse à JTS3
- [48] Compte rendu de réunion IRSN/PSN-SRDS/2016-00019 du 25 mai 2016 – EPR FA3 – Calottes de cuve – Situations – Réunion du 17 février 2016
- [49] Lettre d'Areva NP référencée ARV-IRS-00007 du 14 octobre 2016 – FA3 : Calottes de cuve – Réponse à la question Q1 du courrier IRSN PSN-SRDS 2016-00018
- [50] Note Areva NP référencée BUCLGN-NCR3087B du 7 décembre 2016 – Analyse de stabilité de défauts débouchant en peau interne
- [51] Note d'Areva NP référencée BUCLGN-NCR3040B du 7 décembre 2016 – EPR FA3 – Calottes de cuve – Analyse de stabilité des défauts positionnés aux trois quarts de l'épaisseur en partant de la peau externe
- [52] Lettre d'Areva NP référencée ARV-DEP-00633 du 25 janvier 2017 – FA3 : Calottes de cuve - Réponse à la question 8 de l'IRSN sur la fermeture de la soupape PZR après son ouverture intempestive
- [53] Lettre Areva NP ARV-IRS-00010 du 10 février 2017 – FA3 – Justification des calottes de cuve – Réponses aux questions IRSN sur les surpressions à froid
- [54] Lettre Areva NP ARV-IRS-00011 du 21 février 2017 – FA3 – Calottes de cuve – Réponse à la demande de compléments
- [55] Note d'Areva NP référencée D02 DTIPR-F-16-0344A du 27 octobre 2016 – EPR FA3 – Justification des calottes de cuve – Description thermohydraulique du transitoire d'éjection de grappe (45 cm²)
- [56] Lettre d'Areva NP référencée ARV-IRS-00013 du 23 mars 2017 - FA3 : calottes de cuve – Instructions chocs chauds et froids – Réponses aux actions de la réunion du 2 mars 2017
- [57] Lettre d'Areva NP référencée ARV-IRS-00016 du 31 mars 2017 – FA3 : Calottes de cuve – réponses aux questions 6, 7, 9, 10, 11 et 12 du courrier IRSN (PSN-RES/SEMIA/2017-000111)
- [58] Compte rendu ASN-DEP-ARV-ARV-00831 du 5 avril 2017 – FA3 : Calottes de cuve – Chocs chauds et froids - Compte rendu de la réunion du 2 mars 2017
- [59] Lettre d'Areva NP référencée ARV-IRS-00021 du 13 avril 2017 – FA3 : Calottes de cuve – Justification du profil de reprise de circulation naturelle dans les études de chocs chauds
- [60] Lettre d'Areva NP référencée ARV-IRS-00022 du 19 avril 2017 - FA3 : Calottes de cuve – Réponses aux questions supplémentaires de l'IRSN sur les situations de surpression à froid sur un transitoire additionnel
- [61] Lettre d'Areva NP référencée ARV-IRS-00023 du 19 avril 2017 - FA3 : Calottes de cuve – Réponse à l'action 2 du relevé de conclusion du 3 avril 2017
- [62] Lettre d'Areva NP référencée ARV-IRS-00024 du 20 avril 2017 - FA3 : Calottes de cuve – Réponse à l'action 4 du relevé de conclusion du 3 avril 2017

- [63] Lettre d'EDF référencée D455016052320 du 23 août 2016 – Risque de ségrégation majeure positive résiduelle en carbone des fonds primaires de générateurs de vapeur
- [64] Rapport US-NRC NUREG-1806 – Technical Basis for Revision of the Pressurized Thermal Shock (PTS) Screening Limit in the PTS rule (10CFR 50.61)
- [65] Compte-rendu référencé ASN-DEP-ARV-00851 du 8 juin 2017 – FA3 : Dossier de justification des calottes de cuve – Chocs chauds et froids - Compte rendu de la réunion du 7 avril 2017
- [66] Compte-rendu ASN-DEP-ARV-ARV-00840 du 27 avril 2017 – FA3 : Calottes de cuve - Compte rendu de la réunion IRSN/ASN-DEP/EDF/Areva NP du 3 avril 2017
- [67] Note d'Areva NP référencée D02-ARV-01-110-535A du 5 mai 2017 – EPRTM FA3 Cuve – Calottes de cuve – Analyse de stabilité de défauts débouchants en peau interne des calottes
- [68] Article S. Chapuliot - International journal of pressure vessels and piping – pp. 11-18 - mars 2016 : « Stress intensity factor calculation in sharp and beveled edge nozzle »
- [69] Note d'Areva NP référencée D02-PEER-F-16-0173 A - Outil pour la rupture brutale de la calotte
- [70] Note d'Areva NP référencée NEPR-F DC 81 D du 24 octobre 2008 - EPR FA3 – Dossier des situations de 2° catégorie du circuit primaire principal
- [71] Livre H. Tada, P.C. Paris, G. Irwin – The stress analysis of cracks handbook – 3e édition
- [72] Note Areva NP ARV-DEP-00726 du 28 avril 2017 - Calottes de cuve – Fm/FmR pour toutes les températures d'indexation
- [73] Note d'Areva NP référencée ARV-DEP-00678 du 21 mars 2017 - Réponse au point AM4 du journal des points ouverts des calottes de cuve
- [74] Lettre d'Areva NP référencée ARV-IRS-00016 du 31 mars 2017 – FA3 : Calottes de cuve – réponses aux questions 6, 7, 9, 10, 11 et 12 du courrier IRSN (PSN-RES/SEMIA/2017-000111)
- [75] Lettre d'Areva NP référencée ARV-IRS-00021 du 13 avril 2017 – FA3 : Calottes de cuve – Justification du profil de reprise de circulation naturelle dans les études de chocs chauds
- [76] Lettre d'Areva NP référencée ARV-IRS-00025 du 20 avril 2017 - FA3 : Calottes de cuve – Connexion RIS-RA en mode RA – Réponses aux questions Q1 et Q2
- [77] Note d'EDF référencée D305116045344 indice A
- [78] Note d'EDF référencée D458517029486 du 6 juin 2017 – Positions et actions d'EDF relatives au suivi en service du couvercle et du fond de la cuve de Flamanville 3
- [79] Note d'EDF référencée D458517029054 du 6 juin 2017- Positions et Actions EDF relatives au vieillissement thermique
- [80] Note d'Areva NP référencée ARV-DEP-00755 du 6 juin 2017 – Courrier d'engagements d'Areva NP
- [81] Note d'EDF référencée D458517030291 du 9 juin 2017- Positions et Actions EDF relatives au suivi en service du couvercle de la cuve de Flamanville 3
- [82] Lettre d'Areva NP référencée ARV-IRS-00031 du 30 mai 2017 – FA3 : Calottes de cuve – Réponse à la recommandation n°4 du projet de rapport ASN IRSN pour le GP du 26-27 juin 20417 (version du 26/05/2017)
- [83] Lettre d'Areva référencée NP ARV-IRS-00032 du 31 mai 2017 – FA3 : Calottes de cuve – Réponse à la recommandation n°6 du projet de rapport ASN IRSN pour le GP du 26-27 juin 20417 (version du 26/05/2017)

- [84] Lettre d'Areva NP référencée ARV-IRS-00033 du 6 juin 2017 – FA3 : Calottes de cuve – Fiche réponse à la recommandation n°8 du projet de rapport à destination du GP ESPN
- [85] Lettre d'EDF référencée D458517029531 du 6 juin 2017 – EPR FA3 – Groupe Permanent ESPN des 26 et 27 juin 2017 consacré à l'analyse des conséquences de l'anomalie des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville sur leur aptitude au service – Positions et Actions EDF relatives au caractère exhaustif de la liste des situations de choc thermique sur les calottes de la cuve du réacteur EPR
- [86] Lettre d'Areva NP référencée ARV-IRS-00034 du 9 juin 2017 – FA3 : Calottes de cuve – Fiche réponse à la recommandation n°9 du projet de rapport à destination du GP ESPN

Sigles, abréviations et dénominations

AAC :	Arrêt à chaud
AAF :	Arrêt à froid
APRP :	Accident de perte de réfrigérant primaire
ASG :	Alimentation de secours des générateurs de vapeur
ASME :	American society of mechanical engineers
ASTM :	American society for testing and material
ASN :	Autorité de sûreté nucléaire
BC :	Branche chaude
BF :	Branche froide
CCAP :	Commission centrale des appareils à pression
CIR :	Combustion par infrarouge
CN :	Circulation naturelle
CPA :	Caméra photothermique active
CPP :	Circuit primaire principal
CT :	Éprouvette « Compact tension » destinée à réaliser un essai de ténacité
DDS :	Dossier des situations
DEP :	Direction des équipements sous pression nucléaires de l'ASN
DIDR :	Défaut dû à la décohésion intergranulaire
DSR :	Défaut sous revêtement
EDG :	Éjection de grappe
EPR :	European pressurized reactor
ESPN :	Équipement sous pression nucléaire
FA3 :	Réacteur n° 3 de la centrale nucléaire de Flamanville
GMPP :	Groupe motopompe primaire

GP ESPN : Groupe permanent d'experts pour les équipements sous pression nucléaires

GV : Générateur de vapeur

ICP-AES : Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (spectrométrie d'émission atomique avec plasma couplé par induction)

IJPP : Injection aux joints des pompes primaires

INB : Installation nucléaire de base

Inf : Calotte inférieure (fond de cuve)

IRSN : Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire

IS : Injection de sécurité

ISBP : Injection de sécurité basse pression

ISMP : Injection de sécurité moyenne pression

$J_{0,2}$: Résistance à la déchirure ductile mesurée pour une propagation de 0,2 mm (en $N.m^{-3/2}$)

JSW : Japan Steel Works

K_{CP} : Facteur d'intensité de contraintes (en $MPa.m^{0,5}$)

K_{JC} : Ténacité (en $MPa.m^{0,5}$)

LSD : Lingot à solidification dirigée

MIS : Machine d'inspection en service

MWe : Mégawatt électrique

N4 : Réacteurs français d'EDF de 1450 MWe (Civaux 1 et 2, Chooz B1 et B2)

NDT : Nil Ductility Transition

PTAEE : Perte totale des alimentations électriques externes

PKL : Installation expérimentale représentant à échelle réduite un réacteur à eau sous pression allemand de type Konvoi

PSC : Plaque supérieure de cœur

PZR : Pressuriseur

RRC : Risk Residual Category

RCC-M : Règles de conception et de construction des matériels mécaniques des îlots nucléaires

éditées par l'association française pour les règles de conception, de construction et de surveillance en exploitation des matériels des chaudières électronucléaires (AFCEN)

RCN :	Reprise de la circulation naturelle
RCP :	Circuit primaire principal
RDS :	Rapport de sûreté
REP :	Réacteur à eau sous pression
RGE :	Règles générales d'exploitation
RIS-RA :	Système d'injection de sécurité et de refroidissement à l'arrêt
RIC :	Instrumentation interne du cœur
R_m :	Résistance à la traction (en MPa)
RRA :	Circuit de refroidissement du réacteur à l'arrêt
RRI :	Circuit de refroidissement intermédiaire
$R_{p0,2}$:	Limite d'élasticité conventionnelle pour une déformation de 0,2 % (en MPa)
RSE-M :	Règles de surveillance en exploitation des matériels mécaniques des îlots nucléaires des réacteurs à eau sous pression éditées par l'association française pour les règles de conception, de construction et de surveillance en exploitation des matériels des chaudières électronucléaires (AFCEN)
RT_{NDT} :	Reference Temperature for Nil Ductility Transition ou température de référence à ductilité nulle, déduite de T_{NDT} et T_{CV} selon le paragraphe MC1240 du code RCC-M (en °C)
RTV :	Rupture de tuyauterie vapeur
SEO :	Spectrométrie d'émission optique
SPN :	Section permanente nucléaire de la CCAP
STE :	Spécifications techniques d'exploitation
Sup :	Calotte supérieure (couvercle de cuve)
T_0 :	Température de référence pour l'indexation de la Master Curve, définie selon la norme ASTM E1921 (en °C)
T_{68J} :	Température issue de la courbe de transition de la résilience pour laquelle l'énergie de résilience moyenne vaut 68 J (en °C)
T_{CV} :	Température issue de la courbe de transition de la résilience pour laquelle l'énergie de

	résilience minimale vaut 68 J (en °C)
T _{env} :	Température d'indexation de la courbe de ténacité de l'annexe ZG du code RCC-M permettant d'envelopper de manière optimale les mesures de ténacité (en °C)
T _{NDT} :	Temperature for Nil Ductility Transition ou température de transition à ductilité nulle, déduite des essais Pellini selon le paragraphe MC1230 du code RCC-M (en °C)
TK _{56J} :	Température issue de la courbe de transition de la résilience pour laquelle l'énergie de résilience moyenne vaut 56 J (en °C)
TOFD :	Ultrasons utilisant la technique « time of flight diffraction »
UA :	Calotte sacrificielle dénommée UA
UK :	Calotte sacrificielle dénommée UK
UT :	Ultrasons
VDA :	Vanne de décharge à l'atmosphère
VVP :	Circuit de vapeur principal
ZR :	Zone de recette
ZS :	Zone ségréguée

1. Introduction

Les calottes du couvercle et du fond de la cuve du réacteur EPR de Flamanville ont été fabriquées en 2006 et 2007 par forgeage par l'usine Creusot Forge d'Areva NP.

Ces composants sont soumis à l'exigence de qualification technique¹ de l'arrêté ESPN en référence [3] car ils présentent un risque d'hétérogénéité de leurs caractéristiques.

Dans le cadre de cette qualification technique, Areva NP a mesuré des valeurs de résilience² inférieures aux valeurs mentionnées par le point 4 de l'annexe I de l'arrêté ESPN en référence [3], ce qui l'a amené en 2015 à proposer à l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) une démarche destinée à justifier le caractère suffisant de la ténacité du matériau de ces composants, basée sur un programme d'essais sur des calottes sacrificielles et des analyses de mécanique du risque de rupture brutale.

Cette démarche a fait l'objet d'une instruction de l'ASN et de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) formalisée dans le rapport en référence [5], d'un avis en référence [6] du groupe permanent d'experts pour les équipements sous pression nucléaires (GP ESPN), réuni le 30 septembre 2015, et de demandes de l'ASN, portant notamment sur les dispositions de suivi en service, dans sa lettre en référence [7]. Sous réserve de la prise en compte de ces demandes, l'ASN a considéré que la démarche de justification est appropriée pour autant que le phénomène en cause soit identifié et expliqué, et que la connaissance acquise au travers du programme d'essais soit suffisante pour le caractériser.

Les premiers résultats des essais ont amené Areva NP, en avril 2016, à faire évoluer sa démarche de justification, notamment le programme d'essais sur calottes sacrificielles, ce qui a donné lieu à une réunion d'information du GP ESPN le 24 juin 2016, s'appuyant sur la note de synthèse établie par l'ASN et l'IRSN en référence [8].

Sur la base des observations du GP ESPN en référence [9], l'ASN a fait part à Areva NP de demandes complémentaires dans sa lettre en référence [10].

*

Le programme d'essais d'Areva NP a été essentiellement mené au cours de l'année 2016. Areva NP a transmis à l'ASN, le 16 décembre 2016, un dossier en référence [11] destiné à justifier que le matériau des calottes du fond et du couvercle de la cuve du réacteur EPR de Flamanville est suffisamment ductile et tenace eu égard aux conditions d'emploi de cet équipement. Ce dossier s'appuie notamment sur les résultats des essais mécaniques et conclut à l'aptitude au service des calottes.

¹ La qualification technique est une exigence réglementaire de l'arrêté ESPN en référence [3], ayant pour objectif de démontrer que les risques d'hétérogénéité de la qualité attendue du composant sont identifiés et maîtrisés et d'assurer que le composant a les caractéristiques requises.

² La résilience est la capacité d'un matériau à absorber de l'énergie quand il se déforme sous l'effet d'un choc. Sa mesure est relativement simple à mettre en œuvre. Cette propriété est donc couramment utilisée par les industriels pour évaluer la qualité d'un matériau.

Dans sa lettre en référence [7], l'ASN a indiqué à Areva NP considérer que l'exigence de qualification technique de l'arrêté ESPN en référence [3] n'est pas respectée pour ces calottes puisque le risque d'hétérogénéité a été mal apprécié et que le matériau n'a pas les caractéristiques attendues.

Areva NP envisage donc de transmettre à l'ASN une demande d'autorisation de mise en service de la cuve du réacteur EPR de Flamanville, alors qu'elle n'a pas satisfait à l'ensemble des exigences réglementaires, en application de l'article 9³ de l'arrêté ESPN en référence [3]. Le présent rapport s'inscrit dans le cadre de l'instruction technique anticipée de cette demande d'autorisation.

Dans sa lettre en référence [7], l'ASN a indiqué à Areva NP qu'une telle demande devra être justifiée au regard des avantages et inconvénients des solutions alternatives, notamment la réparation de la cuve et le remplacement du couvercle.

Areva NP estime que l'approvisionnement d'un nouveau couvercle et le remplacement de l'actuel, qui est une opération qui a déjà été réalisée sur plusieurs réacteurs, nécessite au moins 75 mois. Areva NP et EDF ont également étudié la possibilité de remettre en conformité le fond de la cuve et estiment que les conséquences seraient disproportionnées en termes de coût, de délai et de conséquences sur le modèle de réacteur EPR et sur la filière nucléaire. La remise en conformité nécessiterait d'extraire la cuve de son puits, de remplacer son fond, de la réinstaller et de reconstruire une partie de l'ouvrage de génie civil l'entourant. La durée de ces opérations est estimée à 86 mois. Ces différents éléments, qui ne sont pas instruits dans le cadre du présent rapport, sont détaillés en Annexe 7.

*

L'ASN a décidé de réunir le GP ESPN les 26 et 27 juin 2017 afin de recueillir son avis, au plan technique, sur les conséquences de l'anomalie sur l'aptitude au service des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville.

*

Le présent rapport rappelle la démarche retenue par Areva NP pour justifier que le matériau des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville est suffisamment ductile et tenace eu égard aux conditions d'emploi de cet équipement, et évalue si l'anomalie remet en cause leur aptitude au service. Il aborde successivement la démarche de justification adoptée par Areva NP, l'analyse du risque de rupture brutale (contrôles de fabrication, caractérisation du matériau, caractérisation des chargements thermomécaniques et analyse mécanique), l'impact des irrégularités détectées au sein de l'usine Creusot Forge d'Areva NP et les dispositions de suivi en service.

³ Article 9 de l'arrêté ESPN en référence [3] : « En application de l'article R. 557-1-3 du code de l'environnement, en cas de difficulté particulière et sur demande dûment justifiée, assurant notamment que les risques sont suffisamment prévenus ou limités, l'Autorité de sûreté nucléaire peut, par décision prise après avis de la Commission centrale des appareils à pression, autoriser l'installation, la mise en service, l'utilisation et le transfert d'un équipement sous pression nucléaire ou d'un ensemble nucléaire n'ayant pas satisfait à l'ensemble des exigences des articles L. 557-4 et L. 557-5 du code de l'environnement, du chapitre VII du titre V du livre V de la partie réglementaire du code de l'environnement et du présent arrêté.
La demande doit être accompagnée d'une analyse, menée en lien avec l'exploitant, des conséquences réelles et potentielles vis-à-vis de la protection des intérêts mentionnés à l'article L. 593-1 du code de l'environnement. [...] »

Le présent rapport a été rédigé conjointement par l'IRSN et la direction des équipements sous pression nucléaires (DEP) de l'ASN. Ainsi le terme « rapporteur » utilisé dans le présent rapport désigne indifféremment les spécialistes de l'IRSN et de l'ASN ayant analysé le dossier d'Areva NP en vue d'une présentation devant le GP ESPN les 26 et 27 juin 2017. Il ne retranscrit pas la position qu'adoptera *in fine* l'ASN.

2. Démarche de justification

2.1. Détection de l'écart et origine technique

Les calottes du couvercle et du fond de la cuve du réacteur EPR de Flamanville (voir Figure 1 et les schémas détaillés en Annexe 2) ont été fabriquées en 2006 et 2007 par forgeage. Ces composants sont soumis à l'exigence de qualification technique de l'arrêté ESPN en référence [3] car ils présentent un risque d'hétérogénéité de leurs caractéristiques.

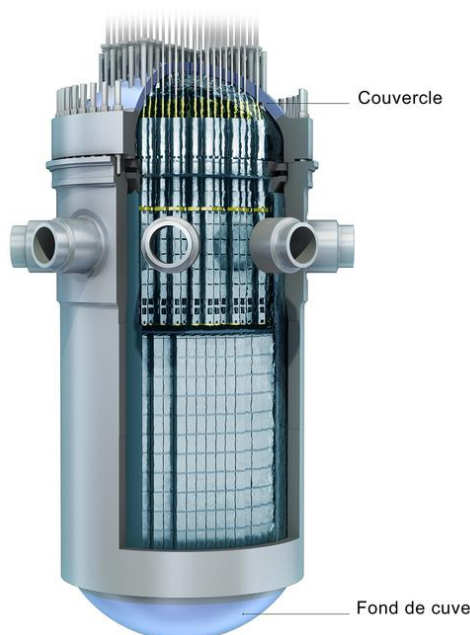


Figure 1 : Représentation de la cuve du réacteur EPR de Flamanville

Fin 2014, Areva NP a informé l'ASN de résultats d'essais de résilience plus faibles qu'attendu. Les essais ont été réalisés dans le cadre de la qualification technique, sur des éprouvettes prélevées sur une calotte destinée initialement à un projet de réacteur EPR aux États-Unis, dénommée calotte supérieure UA, *a priori* représentative de celles destinées à la cuve du réacteur EPR de Flamanville. Les valeurs mesurées à 0 °C sur deux séries de trois éprouvettes présentaient une valeur minimale de 36 J et une valeur moyenne de 52 J ne permettant pas d'atteindre la qualité alors attendue par Areva NP. Ces valeurs sont également inférieures à la valeur de résilience de 60 J mentionnée au point 4 de l'annexe I de l'arrêté ESPN en référence [3].

Areva NP 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 supérieure UA par spectrométrie d'émission optique portative ont montré la présence d'une zone de ségrégation majeure positive résiduelle sur un diamètre d'environ un mètre. Par ailleurs, les examens réalisés sur la matière prélevée en profondeur, au centre de cette calotte, ont montré que la ségrégation s'étend à une profondeur dépassant la mi-épaisseur de la calotte.

Areva NP explique que la ségrégation majeure positive résiduelle issue du lingot utilisé pour le forgeage n'a pas été suffisamment éliminée lors des opérations de chutage. La gamme de fabrication des calottes est rappelée en Annexe 8 et la position de la ségrégation majeure positive au cours du forgeage est présentée dans la Figure 2.

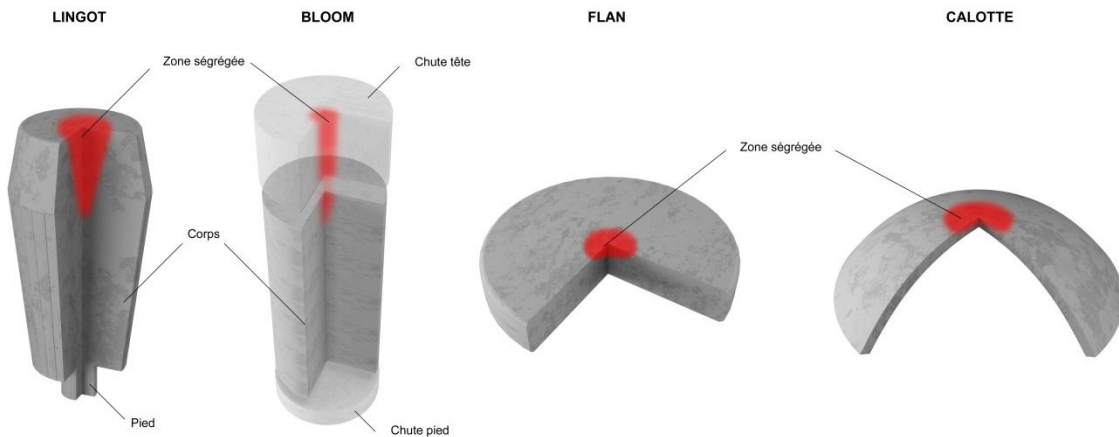


Figure 2 : Position de la ségrégation majeure positive au cours du forgeage

Le phénomène physique de ségrégation intervient lors du refroidissement du lingot, qui ne se réalise pas de manière homogène. Après coulée et solidification de l'acier, les lingots de grandes dimensions comportent ainsi des hétérogénéités macroscopiques de leur composition chimique, en particulier de leur concentration en carbone (Figure 3).

D'une manière générale, dans ce type de lingot, le pied est la partie se solidifiant en premier et conduit à une zone de ségrégation majeure négative (concentration des éléments d'alliage plus faible que la valeur moyenne de coulée). Au contraire, la tête du lingot se solidifie en dernier et est le lieu d'une ségrégation majeure positive (concentration plus élevée que la valeur moyenne de coulée).

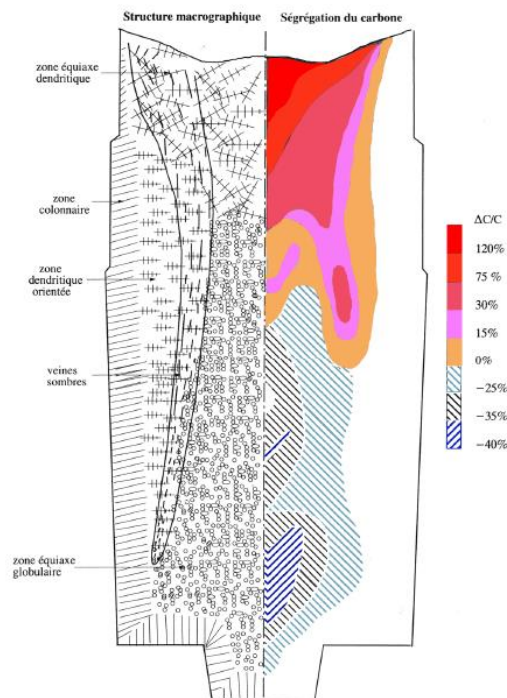


Figure 3 : Structure et ségrégation du carbone d'un lingot conventionnel

Une zone de ségrégation majeure positive est donc caractérisée par une teneur en carbone locale supérieure à la teneur moyenne visée à la coulée dans l'acier liquide. Le taux de ségrégation est alors le ratio de dépassement de la teneur locale par rapport à la teneur visée ($\Delta[C]/[C]_{\text{coulée}}$).

La teneur normale en carbone d'un acier de type 16MND5 comme celui de l'acier de la cuve du réacteur EPR de Flamanville est de 0,16 %. Le code RCC-M définit une teneur maximale de 0,20 % à la coulée et une teneur maximale sur pièce de 0,22 %⁴. Dans le cadre de ce dossier, le volume de matière d'intérêt pour apprécier les propriétés mécaniques du matériau de la zone de ségrégation majeure positive a été défini comme celui présentant une teneur en carbone supérieure à 0,25 % [5].

Une augmentation de la concentration en carbone conduit à de meilleures propriétés de résistance à la traction, mais affecte la résistance à la propagation d'une fissure.

2.2. Principes de la démarche de justification d'Areva NP

2.2.1. Modes de dégradation retenus

Comme indiqué précédemment, les expertises réalisées sur la calotte sacrificielle UA ont montré des propriétés de résilience du matériau plus faibles qu'attendu. Le niveau de résilience étant un indicateur du niveau de ténacité⁵, la zone ségrégée pourrait donc présenter une ténacité insuffisante pour prévenir le risque de rupture brutale aux températures auxquelles l'acier est sollicité.

Areva NP considère que la présence d'une zone de ségrégation majeure positive ne remet pas en cause la prévention des dommages de déformation excessive, de déformation progressive et d'instabilité plastique des calottes de cuve. En effet, les critères de conception vis-à-vis de ces risques dépendent de la limite d'élasticité et de la limite à rupture du matériau qui augmentent avec la teneur en carbone. Le rapporteur prend position sur ce point au paragraphe 4.3.8.

Le dossier d'Areva NP, en référence [11], est donc axé sur la prévention du risque de rupture brutale. Ce risque existe s'il y a conjonction de trois phénomènes :

- la présence d'un défaut technologique nocif (défini par sa position, son orientation et ses dimensions) ;
- la présence d'un matériau insuffisamment tenace ;
- la présence de chargements mécaniques ou thermiques importants.

L'acier utilisé pour fabriquer une cuve de réacteur présente une ténacité variant avec la température du matériau. La démarche d'Areva NP est donc différente selon que le matériau est utilisé :

- dans le domaine de température où il est fragile et où sa ténacité est la plus faible, dit *domaine fragile* ;
- dans le domaine de température de la transition entre les comportements fragile et ductile, dit *domaine de la transition fragile-ductile*, où la ténacité augmente avec la température ;

⁴ Pour les calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville, Areva NP a visé une valeur à la coulée de 0,18 %, de manière à garantir des propriétés de traction acceptables en pied de lingot.

⁵ La ténacité est la capacité d'un matériau à résister à la propagation d'une fissure. Il s'agit de la propriété qui intervient dans le phénomène de rupture brutale.

- dans le domaine de température où il est ductile et où il présente la ténacité la plus élevée, dit *domaine ductile*.

2.2.2. Analyse du risque de rupture dans les domaines fragile et de la transition fragile-ductile

Pour ce qui concerne les domaines fragile et de la transition fragile-ductile, la démarche de justification suivie par Areva NP, présentée dans le document en référence [17], comprend trois étapes principales :

- l'évaluation (par essais) de la ténacité minimale dans la zone de ségrégation majeure positive du matériau, après 60 ans de fonctionnement ;
- la détermination (par calculs) de la ténacité suffisante (encore appelée admissible ou requise) pour prévenir le risque de rupture brutale ;
- la vérification que la ténacité minimale du matériau est bien supérieure à la ténacité suffisante déterminée.

Comme le rapporteur l'avait présenté en 2015 dans son rapport en référence [5], Areva NP retient l'approche de l'annexe ZG du code RCC-M pour modéliser la ténacité du matériau en fonction de la température. Ce modèle à un paramètre est basé sur la courbe ZG 6110 (voir Figure 4) qui doit être indexée avec la température de transition fragile-ductile de référence (RT_{NDT}^6) du matériau. Dans cette approche la ténacité du matériau est donc caractérisée par sa RT_{NDT} .

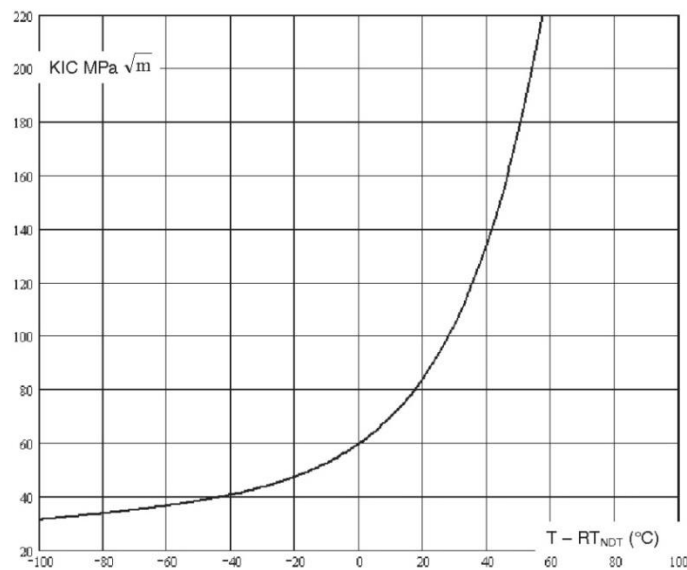


Figure Z G 6110

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 4 : Courbe ZG 6110 du code RCC-M

⁶ Reference Temperature for Nil Ductility Transition ou *température de référence à ductilité nulle*, déduite d'essais Pellini et de résilience selon le paragraphe MC1240 du code RCC-M. L'essai Pellini est un essai de flexion par choc d'une éprouvette rectangulaire avec un cordon de soudure pré-entaillé à la scie.

Selon cette approche, l'effet de la ségrégation majeure positive, qui tend à diminuer la ténacité à une température donnée, se traduit également par une augmentation de la température de référence RT_{NDT} (Figure 5).

Areva NP avait initialement estimé en 2015 que ce décalage serait inférieur à 70 °C et plus vraisemblablement de l'ordre de 35 °C pour l'acier des calottes de la cuve réacteur EPR de Flamanville, à partir des essais de résilience réalisés sur la matière prélevée au centre de la calotte supérieure UA.

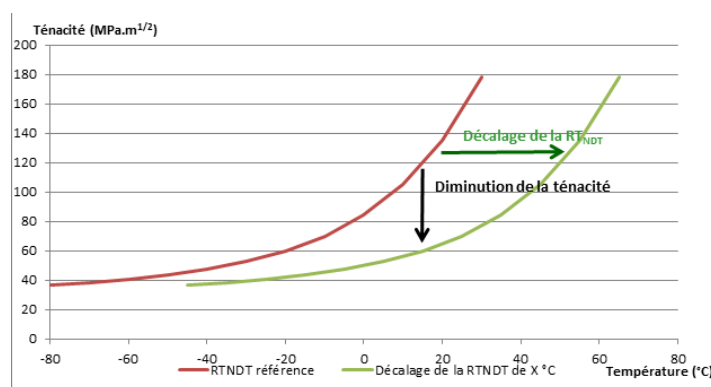


Figure 5 : Effet du décalage de la température de transition sur la ténacité

2.2.2.1. Détermination de la ténacité minimale et des propriétés mécaniques en zone de ségrégation majeure positive

Dans le dossier de justification d'Areva NP, la détermination des propriétés mécaniques du matériau en zone de ségrégation majeure positive et de la ténacité minimale en particulier, repose sur les résultats d'un programme d'essais mené sur trois calottes sacrificielles. En effet, ces essais, dont la plupart sont destructifs, ne peuvent pas être menés directement sur les calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville.

Le recours à des calottes sacrificielles nécessite qu'Areva NP justifie la représentativité de celles-ci par rapport aux calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville.

Programme expérimental

L'objectif du programme d'essais proposé par Areva NP, présenté dans le document en référence [17], est d'évaluer :

- l'étendue et la teneur en carbone de la zone ségrégée, afin de localiser la matière utile aux essais de caractérisation des propriétés mécaniques ;
- les caractéristiques mécaniques du matériau dans ces zones d'intérêt, affectées de ségrégation majeure positive, et principalement sa ténacité.

Trois calottes sacrificielles ont été retenues :

- une calotte supérieure forgée initialement pour le projet de réacteur EPR d'Hinkley Point (calotte supérieure UK, appelée « UK sup » dans la suite du rapport) ;
- une calotte inférieure forgée initialement pour un projet de réacteur EPR aux États-Unis (calotte inférieure UA, appelée « UA inf » dans la suite du rapport) ;
- une calotte supérieure forgée initialement pour le même projet de réacteur aux États-Unis (calotte supérieure UA, appelée « UA sup » dans la suite du rapport). Des essais

réalisés dans une carotte prélevée au centre de cette calotte sont à l'origine de la mise en évidence de l'anomalie fin 2014. Cette calotte a été ajoutée au programme en 2016 par Areva NP à la suite des premiers résultats.

Le programme d'essais est détaillé dans la partie 4.1 du présent rapport.

Représentativité des calottes sacrificielles

La justification par Areva NP de la représentativité des calottes sacrificielles par rapport aux calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville, présentée en référence [12], s'appuie sur l'analyse de deux facteurs, liés au procédé de fabrication, prépondérants concernant le risque de rupture brutale :

- la teneur en carbone ;
- l'effet de trempe⁷, caractérisé par la vitesse de refroidissement lors de la trempe.

Par ailleurs, Areva NP a comparé les propriétés mécaniques en zone de recette de chacune des calottes, y compris celles de la cuve du réacteur EPR de Flamanville.

La justification de la représentativité des différentes calottes est détaillée dans la partie 4.2 du présent rapport.

2.2.2.2. Détermination de la ténacité suffisante pour justifier la prévention du risque de rupture brutale

La ténacité suffisante a été définie par Areva NP en 2015 comme la valeur minimale de ténacité du matériau permettant de respecter les critères de l'annexe ZG du code RCC-M pour prévenir le risque d'amorçage de défaut. Cette valeur minimale est calculée en considérant :

- les plus gros défauts technologiques potentiellement présents dans le couvercle et le fond de cuve (cf. partie 3) ;
- les sollicitations auxquelles les défauts sont soumis dans les différentes situations de fonctionnement (cf. partie 5) ;
- les coefficients de sécurité prévus par l'annexe ZG du code RCC-M dépendant de la catégorie de la situation (cf. partie 6).

2.2.2.3. Comparaison de la ténacité minimale à la ténacité suffisante

Après avoir déterminé la ténacité minimale du matériau et la ténacité suffisante pour justifier la prévention du risque de rupture brutale, Areva NP vérifie que la première est bien supérieure à la seconde (voir Figure 6). Cette comparaison permet également de déterminer les marges vis-à-vis du risque d'amorçage de la rupture.

⁷ Pour un acier tel que le 16MND5, la trempe améliore les propriétés de ténacité et de résilience.

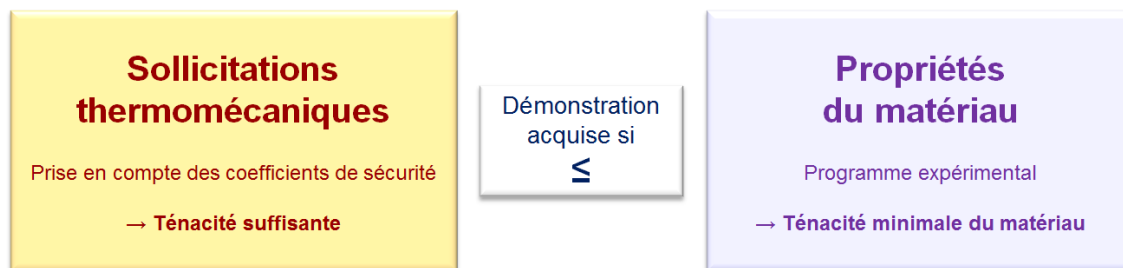


Figure 6 : Démarche générale de justification

2.2.3. Analyse du risque de rupture dans le domaine ductile

Areva NP s'assure du bon comportement des calottes de la cuve dans le domaine ductile par l'évaluation de la ténacité du matériau à partir d'essais de déchirure sur des éprouvettes de ténacité réalisés à 50 °C et 330 °C afin de couvrir l'ensemble des températures rencontrées en situation de fonctionnement du réacteur.

Areva NP compare directement les valeurs de ténacité issues des essais de déchirure à ces températures :

- aux valeurs codifiées dans l'annexe ZG du code RCC-M ;
- dans le cas où les valeurs codifiées dans l'annexe ZG du code RCC-M ne seraient pas atteintes, à la sollicitation maximale calculée pour une fissure postulée dans la zone d'intérêt pour toutes les situations de fonctionnement.

2.3. Positions prises par l'ASN depuis 2015

2.3.1. Position de l'ASN à la suite de la réunion du GP ESPN du 30 juin 2015

La démarche proposée par Areva NP en 2015 dans les documents en références [17] et [18] a fait l'objet d'une première instruction du rapporteur formalisée dans le rapport en référence [5] et d'un examen par le GP ESPN le 30 septembre 2015 qui a rendu un avis en référence [6] sur les points suivants :

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

Sur la base de cette instruction et de cet avis, l'ASN a pris position sur cette démarche et a fait part de ses observations et ses demandes dans la lettre du 14 décembre 2015 en référence [7].

Sous réserve de la prise en compte de ses observations et de ses demandes, l'ASN a indiqué à Areva NP qu'elle considérait que la démarche de justification était appropriée pour autant que le

phénomène en cause soit identifié et expliqué et que la connaissance acquise au travers du programme d'essais soit suffisante pour caractériser le matériau.

Les demandes de l'ASN portaient notamment sur les dispositions de suivi en service à mettre en œuvre sur les calottes (voir chapitre 8).

De plus, l'ASN a souligné que cette démarche de justification repose sur l'hypothèse de propriétés mécaniques satisfaisantes à mi-épaisseur, notamment en matière de résilience, et que dans le cas où cette hypothèse ne serait pas confirmée par les résultats des essais réalisés sur les calottes sacrificielles, le dossier de justification devrait être complété. Dès début 2016, Areva NP a mis en évidence que la ségrégation dépasse la mi-épaisseur des calottes et a donc été amené à faire évoluer sa démarche de justification.

2.3.2. Position de l'ASN à la suite de la réunion du GP ESPN du 24 juin 2016

Les évolutions de la démarche d'Areva NP et du programme d'essais, ainsi que les premiers résultats ont donné lieu à une réunion d'information du GP ESPN le 24 juin 2016, s'appuyant sur la note de synthèse établie par le rapporteur en référence [8].

Sur la base des observations du GP ESPN en référence [9], l'ASN a fait part à Areva NP de demandes complémentaires dans la lettre en référence [10] et a indiqué à Areva NP qu'elle n'avait pas d'objection à l'ajout d'une troisième calotte au programme d'essais et aux évolutions visant à étayer le dossier relatif à la représentativité des calottes sacrificielles.

L'ASN a également demandé à Areva NP, dans la lettre en référence [10], d'étendre les analyses de risque de rupture brutale à des défauts postulés en peau interne, sous le revêtement.

Le tableau en Annexe 15 reprend les demandes des lettres en références [7] et [10], les engagements pris par Areva NP dans le courrier en référence [26] et la référence de ses réponses.

3. Contrôles par essais non destructifs réalisés lors de la fabrication : recherche des défauts potentiellement présents dans le couvercle et le fond de cuve

3.1. Rappel des demandes formulées par l'ASN à la suite des séances du GP ESPN des 30 septembre 2015 et 24 juin 2016

Dans la documentation technique des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville, Areva NP a spécifié les défauts inacceptables au sens de l'exigence 3.4 de l'annexe I de l'arrêté ESPN en référence [3]. Ces défauts sont rappelés dans le Tableau 1.

Défauts	Origine	Caractéristiques (fin de fabrication)	Définition quantitative et qualitative des défauts inacceptables
Inclusion exogène débouchant en surface	Élaboration	Défaut de surface linéaire ou arrondi qui peut être isolé ou en chapelet	10 défauts linéaires isolés de dimension supérieure à 2 mm compris dans un secteur de 90° Un nuage de 5 défauts ou plus linéaires ou arrondis de dimension supérieure à 2 mm circonscrit dans une surface de 250 cm ²
Inclusion exogène dans le volume		Défaut plan ou volumique orienté dans le sens du fibrage	10 défauts isolés de dimension supérieure à 10 mm compris dans un secteur de 90° Un nuage de 5 défauts ou plus de dimension supérieure à 5 mm quelle que soit sa position dans la pièce et qui ne peut être circonscrit dans une surface de 250 cm ²
Replis-criques	Forgeage	Défaut de surface à lèvres ouvertes dont l'orientation est quelconque	Tout défaut linéaire détectable visuellement de longueur supérieure à 3 mm
Défaut dû à l'hydrogène	Élaboration et traitement thermique de précaution	Défaut plan parallèle au sens du fibrage	Tout défaut identifié comme défaut dû à l'hydrogène quelle que soit la dimension de celui-ci

Tableau 1 : Spécification des défauts inacceptables dans les calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville

Areva NP a mis en œuvre les contrôles par essais non destructifs suivants pour détecter ces défauts en cours de fabrication :

- un contrôle visuel de toutes les surfaces au cours des différentes phases de fabrication et d'usinage ;
- un contrôle par ressuage des surfaces interne et externe des calottes après usinage final ;
- un contrôle volumique par ultrasons en ondes longitudinales droites (OL 0°) à partir de la surface interne et en ondes transversales (OT 45°) après usinage final ou à un stade aussi avancé que possible pour les parties non contrôlables au stade final. Le contrôle par ondes longitudinales droites a été réalisé avec un gain augmenté de +12 dB par rapport au gain requis par le code RCC-M.

Les performances des contrôles présentées par Areva NP sont les suivantes :

- pour 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, la détectabilité de défauts de 3 mm x 8 mm pour la calotte inférieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville et de 3 mm x 10 mm pour la calotte supérieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville est assurée ;
- pour les défauts plans perpendiculaires aux peaux des calottes, Areva NP indique que les performances de détection restent très dépendantes de la « rugosité des défauts ». Si le défaut est rugueux, la détection d'un défaut de dimensions 10 mm x 20 mm est garantie pour les défauts débouchants ou sous-jacents et 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. Le défaut reste toutefois détecté correctement lorsqu'il est débouchant ou présente un petit ligament⁸ par rapport à la surface, y compris avec une légère désorientation.

Areva NP n'a détecté au cours de ces contrôles aucune indication non conforme aux critères du code RCC-M. Des indications notables ont cependant été relevées par le contrôle par ultrasons en surpuissance (contrôle au gain augmenté de +12 dB, non imposé par le code RCC-M) sur la calotte inférieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville (indications ponctuelles de dimension inférieure à 2 mm, positionnées entre 70 mm et 140 mm de profondeur à partir de la paroi intérieure, concentrées au centre de la calotte). Les procès-verbaux de ce contrôle ont été transmis au rapporteur.

Dans son rapport en référence [5] en vue de la séance du 30 septembre 2015 du GP ESPN, le rapporteur n'a pas remis en cause la définition et la justification des défauts inacceptables pris en compte par Areva NP et a partagé les conclusions énoncées par Areva NP sur la détectabilité des défauts plans. Il a également considéré que les résultats des contrôles permettent de conclure avec une raisonnable assurance à l'absence de défauts inacceptables dans les calottes.

Toutefois, pour ce qui concerne le contrôle de surface, le rapporteur a estimé que le contrôle le plus pertinent aurait été le contrôle par magnétoscopie, tel que requis par le code ASME pour le matériau SA 508. Ce contrôle de surface n'a pas été réalisé par Areva NP au stade de la fabrication. Seuls ont été réalisés des examens par contrôle visuel et par 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.

Pour pallier l'absence de ce contrôle, Areva NP s'est engagé en 2015 à fournir des éléments destinés à justifier l'absence de défauts débouchants et l'ASN a demandé à Areva NP de réaliser sur la calotte inférieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville des essais non destructifs de surface, autres que le ressuage.

⁸ 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.

Par ailleurs, à la suite du dépouillement des premiers résultats du programme d'essais, Areva NP a complété son dossier par la prise en compte de défauts postulés aux trois quarts de l'épaisseur à partir de la face externe. Après avoir informé le GP ESPN de ces éléments lors de sa séance du 24 juin 2016, l'ASN a demandé à Areva NP par courrier en référence [10] de mettre en œuvre des contrôles de recherche de défauts sous revêtement en peau interne de la calotte inférieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville.

3.2. Éléments transmis par Areva NP

3.2.1. Éléments transmis par Areva NP pour répondre à ses engagements

Areva NP a procédé à tous les contrôles non destructifs qu'il s'était engagé à réaliser. Ces contrôles avaient pour objectif la recherche de défauts débouchants qui n'auraient pas été détectés lors des contrôles par ressuage réalisés lors de la fabrication.

Sur la calotte inférieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville, Areva NP a mis en œuvre en mars 2017 un contrôle par ressuage long, c'est-à-dire avec un temps d'imprégnation du pénétrant porté à 120 minutes et un temps de révélation compris entre 10 et 30 minutes. Areva NP a réalisé par ailleurs pour la calotte inférieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville, en 2015, un contrôle par ressuage après l'élimination des points d'impact (quelques dixièmes de millimètres) dus à la mise en œuvre des mesures de teneur en carbone par spectrométrie d'émission optique (voir partie 4.1.1.4). Ce contrôle par ressuage n'a pas été réalisé sur le couvercle de la cuve du réacteur EPR de Flamanville compte tenu du risque d'introduire des produits de ressuage dans les interstices entre les adaptateurs et le couvercle.

Sur la calotte supérieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville, Areva NP a pu réaliser un contrôle par magnétoscopie sur la partie périphérique en dehors de la zone d'implantation des adaptateurs. Dans la zone centrale où se situent les adaptateurs, qui est également celle où se trouve la ségrégation majeure positive, ce contrôle n'a pas été réalisé pour des raisons d'accessibilité et compte tenu du risque d'introduire du produit de contrôle (liqueur magnétique) dans les interstices entre les adaptateurs et le couvercle.

Par ailleurs, afin de consolider son dossier, Areva NP a transmis au rapporteur les résultats des contrôles réalisés sur la calotte supérieure UA par magnétoscopie et par ressuage long, et sur la calotte inférieure UA par magnétoscopie.

L'ensemble de ces contrôles n'a détecté aucune indication dépassant les critères du code RCC-M. Les résultats sont présentés dans le Tableau 2.

Composant	Type de contrôle	Résultats
Calotte inférieure FA3	Ressuage longue durée	23 mars 2017 – Conforme
Calotte inférieure FA3	Ressuage après spectrométrie	05 février 2015 - Conforme
Calotte supérieure FA3	Magnétoscopie en zone périphérique	du 22 au 24 janvier 2016 - Conforme
Calotte supérieure UA	Ressuage longue durée	25 mars 2016 – Conforme
Calotte supérieure UA	Magnétoscopie avant épreuve	du 21 avril au 3 mai 2010 - Conforme
Calotte supérieure UA	Magnétoscopie après épreuve	du 26 au 30 mars 2016 - Conforme
Calotte inférieure UA	Magnétoscopie avant épreuve	du 10 au 24 octobre 2011 - Conforme

Tableau 2 : Contrôles non destructifs réalisés dans le cadre des engagements Areva NP

3.2.2. Éléments transmis par Areva NP pour répondre aux demandes formulées par l'ASN

3.2.2.1. *Contrôles de recherche de défauts sous revêtement en peau interne des calottes inférieure et supérieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville*

Par courrier en référence [19], l'ASN a demandé à Areva NP de justifier les mesures mises en œuvre pour le contrôle et la prévention des défauts sous revêtement des composants revêtus du circuit primaire principal.

Dans son courrier en référence [20], Areva NP a identifié les défauts susceptibles d'apparaître sous le revêtement de la peau interne après l'opération de soudage. Il s'agit de défauts liés à la fissuration à froid (DSR) et des décohésions inter-granulaires dues au réchauffage (DIDR). Ces défauts sont préférentiellement situés sous le revêtement dans les zones ségréguées du métal de base et orientés perpendiculairement à la surface du revêtement.

Lors du dépôt du revêtement en acier austénitique sur les calottes inférieure et supérieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville, Areva NP a mis en œuvre des dispositions opératoires pour se prémunir de l'apparition de tels défauts :

- une température de préchauffage de 150 °C minimum ;
- une température entre passes de 250 °C maximum ;
- une température de post-chauffage de 250 °C minimum pendant au moins quatre heures ;
- un revêtement réalisé du côté du pied du lingot des calottes afin de l'éloigner de la ségrégation majeure positive du carbone ;
- des conditions sur le chevauchement et le recouvrement des passes de soudage.

Areva NP a vérifié l'efficacité de ces dispositions par des contrôles par ultrasons sur les premières pièces fabriquées (même métal de base, même procédé de soudage du revêtement et même métal d'apport). Cette vérification ne portait toutefois *a priori* pas sur des pièces qui comportaient des zones ségréguées.

L'ASN a demandé à Areva NP de réaliser un contrôle de même nature sur les calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville.

Ce contrôle réalisé en usine repose sur un examen par ultrasons, par ondes longitudinales inclinées de 70°. La procédure pour ce contrôle demande que les indications dont l'amplitude est supérieure ou égale à 50 % de l'amplitude de l'écho du trou de référence (trou à fond plat de diamètre de 2 mm) soient notées et ensuite caractérisées. Areva NP a procédé dans les années 1980 à des essais de caractérisation de performance de ce contrôle par ultrasons et a conclu que des fissures de surface supérieure à 2 mm² peuvent être détectées (valeur issue du rapport en référence [21]). Les résultats de ces contrôles mis en œuvre sur les calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville sont présentés dans le Tableau 3.

Composant	Type de contrôle	Résultats
Calotte inférieure FA3 (totalité de la surface)	Ultrasons Contrôle recherche DSR	13 au 15 décembre 2016 Conforme
Calotte supérieure FA3 (contrôle partiel)	Ultrasons Contrôle recherche DSR après traitement thermique de détensionnement	3 au 8 février 2014 Conforme
	Ultrasons Contrôle recherche DSR après traitement thermique de détensionnement et après élimination des talus	25 au 26 juin 2015 Conforme

Tableau 3 : Contrôles non destructifs réalisés pour répondre aux demandes de l'ASN

En ce qui concerne la calotte supérieure, toute la surface n'a pas pu être contrôlée. La zone contrôlée correspond à 92 % du revêtement de la calotte. Les 8 % restants correspondent aux zones non accessibles définies sur la Figure 7. Tout le centre de la calotte, sur un diamètre supérieur à 1,2 m, a ainsi été contrôlé, ce qui couvre la zone potentiellement ségréguée.

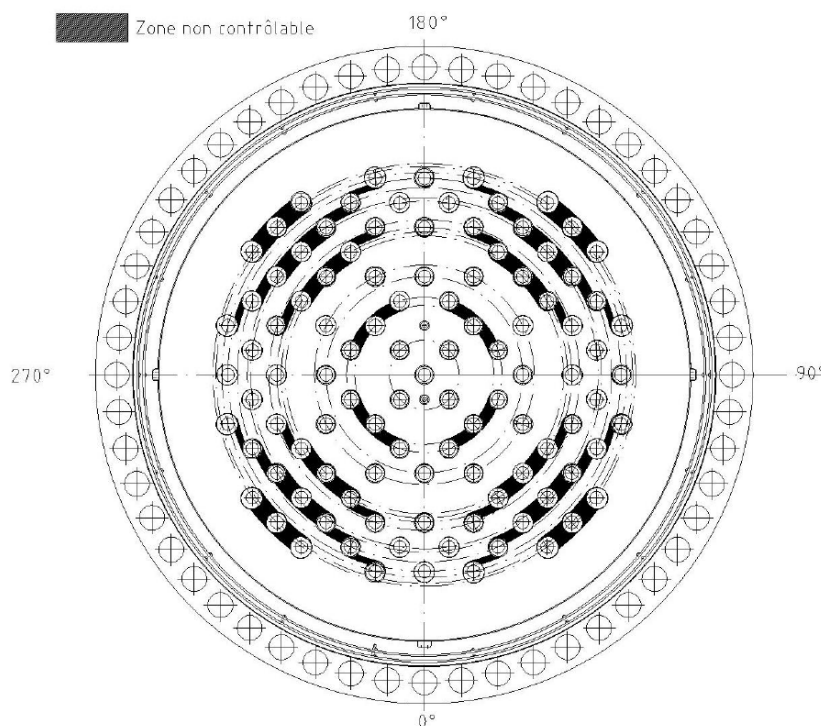


Figure 7 : Zones non contrôlées sur la calotte supérieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville pour ce qui concerne la recherche de défauts sous revêtement

3.2.2.2. Réalisation d'essais non destructifs en fond de cuve, autres que le ressuage

L'ASN a demandé à Areva NP de s'assurer, par un contrôle non destructif, que la présence d'oxydes apparus en cours d'élaboration, principalement sur des surfaces rugueuses, n'a pas pu masquer la présence de défauts lors du contrôle de surface par ressuage réalisé sur la calotte inférieure⁹ de la cuve du réacteur EPR de Flamanville.

⁹ Pour mémoire, le rapporteur a partagé avec Areva NP, dans le cadre de l'instruction menée en 2015, le constat qu'aucun contrôle surfacique complémentaire à ceux déjà réalisés n'est envisageable sur la surface externe de la calotte supérieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville, du fait de la présence des adaptateurs.

Par courrier en référence [25], Areva NP a précisé que des criques pourraient se remplir d'oxydes lors des opérations de chauffage en cours de forgeage. Cependant, entre le stade possible d'apparition de ces oxydes et le stade du contrôle par ressuage, Areva NP a indiqué qu'une épaisseur de métal importante a été éliminée par usinage, ce qui rend peu probable la présence de ces oxydes.

Areva NP a cependant engagé un programme de contrôle par essais non destructifs destiné à détecter de tels défauts en adoptant une démarche de qualification conventionnelle. Cette démarche assure que le procédé par caméra photothermique active (CPA) retenu par Areva NP permet de détecter les défauts débouchants de 5 mm de longueur, désorientés, éventuellement remplis d'oxydes, et pouvant présenter une surface lisse. Cette technique est comparée à des méthodes alternatives dans le Tableau 4.

Technique	Sensibilité comparable à la magnétoscopie	Contrôle au plafond	Justification de la détection de défauts remplis d'oxydes	Capacité à dimensionner les indications en profondeur	Orientation des passes de balayage
Thermographie laser	Oui	Oui	Oui	Non	0° et 90°
Ultrasons TOFD	Oui	Oui (gestion du couplant)	Non	Oui	0° et 90°
Ultrasons creeping wave	Oui	Oui (gestion du couplant)	Non	Oui	Tous les 15°
Courants de Foucault	Oui	Oui	Non	Non	0° et 90°
ACFM (type courant de Foucault)	Non	Oui	Non	Oui	0° et 90°

Tableau 4 : Analyse des performances des méthodes de contrôles non destructifs

Areva NP a retenu une technique par ultrasons TOFD (time of flight diffraction) pour dimensionner les indications détectées par la méthode CPA.

La méthode CPA consiste à chauffer localement la surface à inspecter au moyen d'un rayon laser focalisé. L'émission infrarouge de la surface à proximité du point de chauffage est mesurée par un détecteur infrarouge. Les défauts sont détectés par l'effet de barrière thermique créée par leur présence.

Areva NP a réalisé un programme de justification des performances du contrôle par thermographie présenté dans le document en référence [22], utilisant des maquettes présentant des défauts types débouchants, de 1,5 mm x 3 mm, 2,5 mm x 5 mm et 10 mm x 30 mm, et des défauts sous-jacents de longueurs 3, 5 et 20 mm, avec des ligaments variant de 0,1 mm à 1 mm. Dans ce programme a également été simulée la réponse d'une entaille remplie d'oxyde et d'une entaille remplie de poudre de ferrite de fer compactée. Areva NP conclut à la détectabilité de l'ensemble de ces défauts.

Au cours de ce programme, Areva NP a comparé les performances de détection entre la magnétoscopie et la méthode CPA. Les résultats sont présentés dans le Tableau 5 et montrent que les discontinuités qui sont détectées en magnétoscopie et pas en CPA sont celles de ligaments importants et de longueur inférieure à 3 mm. Dans ce tableau sont également reportés les résultats qu'un contrôle par ressuage aurait donnés, avec des entailles débouchantes de dimensions supérieures à la sensibilité de la méthode par ressuage.

Ligament de l'entaille	Longueur de l'entaille	Détection par magnétoscopie	Détection par thermographie	Détection par ressuage
0 mm	3 mm	Oui	Oui	Oui
0 mm	5 mm	Oui	Oui	Oui
0 mm	20 mm	Oui	Oui	Oui
0,1 mm	3 mm	Oui	Oui	Non
0,1 mm	5 mm	Oui	Oui	Non
0,1 mm	20 mm	Oui	Oui	Non
0,2 mm	3 mm	Oui	Oui	Non
0,2 mm	5 mm	Oui	Oui	Non
0,2 mm	20 mm	Oui	Oui	Non
0,3 mm	3 mm	Oui	Oui	Non
0,3 mm	5 mm	Oui	Oui	Non
0,3 mm	20 mm	Oui	Oui	Non
0,4 mm	3 mm	Oui	Oui	Non
0,4 mm	5 mm	Oui	Oui	Non
0,4 mm	20 mm	Oui	Oui	Non
0,5 mm	3 mm	Oui	Oui	Non
0,5 mm	5 mm	Oui	Oui	Non
0,5 mm	20 mm	Oui	Oui	Non
0,6 mm	3 mm	Oui	Oui	Non
0,6 mm	5 mm	Oui	Oui	Non
0,6 mm	20 mm	Oui	Oui	Non
0,8 mm	3 mm	Oui	Non	Non
0,8 mm	5 mm	Oui	Oui	Non
0,8 mm	20 mm	Oui	Oui	Non
1 mm	3 mm	Oui	Non	Non
1 mm	5 mm	Oui	Oui	Non
1 mm	20 mm	Oui	Oui	Non

Tableau 5 : Comparaison des performances entre les méthodes de contrôles

La méthode par ultrasons TOFD a fait l'objet d'un dossier de justification technique en référence [23]. L'objectif est de caractériser les défauts décrits dans le programme de performance de la méthode CPA. Il s'agit de démontrer la capacité de la méthode par ultrasons TOFD à dimensionner les défauts détectés avec la méthode CPA.

Areva NP a analysé l'impact des différents paramètres influents (présence d'oxydes, géométrie du défaut, inclinaison du défaut, paramètres liés à la mise en œuvre), d'une part en utilisant des maquettes avec entailles électro-érodées débouchantes ou avec des ligaments variables, d'autre part en réalisant des traitements par simulation et des analyses par jugement de l'ingénieur.

Areva NP conclut que la méthode par ultrasons TOFD permet, lorsque la méthode CPA a détecté des indications, de les dimensionner lorsqu'elles sont supérieures ou égales à 1,5 mm x 3 mm.

Pour vérifier que des discontinuités non détectables par ressuage, car remplies d'oxydes, le sont par magnétoscopie et par thermographie, l'ASN a demandé à Areva NP de contrôler des maquettes oxydées par traitement thermique avec trois méthodes (ressuage, magnétoscopie et CPA). Le programme proposé par Areva NP a consisté à réaliser quatre maquettes, une pour chaque méthode de contrôle (ressuage, magnétoscopie, CPA et ultrasons). Sur chaque maquette est implanté un défaut débouchant (longueur de 5 mm, hauteur de 2,5 mm). Ces maquettes sont ensuite oxydées. Après plusieurs essais d'oxydation, Areva NP a pu, par une technique d'oxydation au four couplée à une compression isostatique à chaud¹⁰, réaliser des maquettes qui ont montré que des défauts remplis d'oxydes non détectés par ressuage le sont par magnétoscopie et par la méthode CPA. Les résultats sont présentés sur Tableau 6.

Technique	Nombre de défauts détectés
Ressuage	0/4
Ressuage longue durée	1/4
Magnétoscopie par passage de champ	4/4
Magnétoscopie par passage de courant	4/4
Thermographie	4/4

Tableau 6 : Résultats obtenus pour quatre défauts débouchants de longueur 5 mm et de hauteur 2,5 mm remplis d'oxydes

Le contrôle avec la méthode CPA sur le fond de la cuve du réacteur EPR de Flamanville a été réalisé par Areva NP du 16 août au 27 septembre 2016. À la suite de ce contrôle, Areva NP a noté six indications dont la signature thermique nécessitait une caractérisation.

Areva NP a caractérisé ces indications par un contrôle visuel, compte tenu du fait que ces indications débouchaient en surface et n'étaient pas remplies d'oxyde. Le procès-verbal de contrôle visuel conclut que les six indications sont conformes au critère « A »¹¹ de la procédure en référence [24].

3.3. Position du rapporteur

Les contrôles réalisés par Areva NP sur les calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville avant sa mise en service sont présentés dans le Tableau 7 et le Tableau 8.

¹⁰ La technique de compression isostatique à chaud consiste à soumettre les pièces à l'action simultanée de hautes pressions et températures élevées, dans une atmosphère inerte, afin d'augmenter leur compacité (élimination des porosités internes qui pourraient donner lieu à des indications détectées par ressuage).

¹¹ Ne sont pas conformes au critère « A » les chocs, griffures, coups d'outil et éraflures dont la profondeur est supérieure à 0,5 mm.

Composant	Zone contrôlée	Nature du contrôle	Résultats	Contexte et référentiel du contrôle
Calotte inférieure FA3	Faces externe et interne après usinage final	Ressuage	Conforme Aucune indication linéaire supérieure à 1 mm	Contrôles réalisés au stade de la fabrication selon le code RCC-M et à titre interne (cf. § 3.1 et [5])
	Volume	Ultrasons en ondes longitudinales 0° depuis la face interne	Novembre 2007 – Conforme Quelques indications ponctuelles inférieures au seuil de notation amélioré, équivalent au trou à fond plat de diamètre 2 mm	
	Volume	Ultrasons en ondes transverses 45° depuis la face interne	Novembre 2007 – Conforme Aucune indication	
	Face externe	Ressuage longue durée	23 mars 2017 - Conforme Aucune indication linéaire supérieure à 1 mm	Contrôles réalisés selon les engagements d'Areva NP à la suite du GP ESPN du 30 septembre 2015 selon les critères du code RCC-M (cf. § 3.2.1 et [26])
	Face externe	Ressuage après spectrométrie	5 février 2015 – Conforme Aucune indication linéaire supérieure à 1 mm	
	Volume	Ultrasons Contrôle recherche DSR (totalité de la surface) (cf. § 3.2.2.1)	13 au 15 décembre 2016 Conforme	Contrôles réalisés à la demande de l'ASN selon critères spécifiques [10]
	Face externe	Caméra photothermique active (cf. § 3.2.2.2)	16 au 27 août 2016 Six indications conformes après caractérisation visuelle	
	Volume	Ultrasons en ondes longitudinales 0° depuis la face externe sur un diamètre de 1600 mm	13 juin 2017 – Conforme Aucune indication notable	Contrôles réalisés à la demande du rapporteur en cours d'instruction (cf. § 7.3)
	Volume	Ultrasons en ondes transverses 45° depuis la face externe sur un diamètre de 1600 mm	14 juin 2017 – Conforme Aucune indication notable	

Tableau 7 : Synthèse des contrôles réalisés par Areva NP sur la calotte inférieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville

Composant	Zone contrôlée	Nature du contrôle	Résultats	Contexte et référentiel du contrôle
Calotte supérieure FA3	Faces externe et interne après usinage final	Ressuage	Conforme Aucune indication linéaire supérieure à 1 mm	Contrôles réalisés au stade de la fabrication selon le code RCC-M et à titre interne (cf. § 3.1 et [5])
	Volume	Ultrasons en ondes longitudinales 0° depuis la face interne	Octobre 2007 - Conforme Aucune indication	
	Volume	Ultrasons en ondes transverses 45° depuis la face interne	Octobre 2007 - Conforme Aucune indication	
	Face externe	Magnétoscopie en zone périphérique	22 au 24 janvier 2016 – Conforme Aucune indication linéaire supérieure à 1 mm	Contrôles réalisés selon les engagements d'Areva NP à la suite du GP ESPN du 30 septembre 2015 selon les critères du code RCC-M (cf. § 3.2.1 et [26])
	Volume	Ultrasons Contrôle recherche DSR après traitement thermique de détensionnement (contrôle partiel selon la Figure 7)	3 au 8 février 2014 Conforme	Contrôles réalisés selon les demandes de l'ASN selon critères spécifiques (cf. § 3.2.2 et [10])
Volume	Ultrasons Contrôle recherche DSR après traitement thermique de détensionnement et après élimination des talus (contrôle partiel selon la Figure 7)	25 au 26 juin 2015 Conforme		

Tableau 8 : Synthèse des contrôles réalisés par Areva NP sur la calotte supérieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville

3.3.1. Contrôles réalisés lors de la fabrication

Le rapporteur confirme ses conclusions de 2015 rappelées dans le paragraphe 3.1 : les performances et les résultats des contrôles réalisés pendant la fabrication permettent de conclure avec une raisonnable assurance à l'absence de défaut inacceptable (cf. tableau 1) dans les deux calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville.

Il rappelle toutefois que les procédés de contrôle par essais non destructifs réalisés en usine lors de la fabrication ne sont pas soumis à une exigence de qualification comme les procédés mis en œuvre lors du suivi en service, au titre de l'arrêté du 10 novembre 1999 en référence [2].

3.3.2. Contrôles complémentaires de la surface externe des calottes

Afin de répondre aux questions du rapporteur, Areva NP a mené des contrôles en surface externe des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville afin de s'assurer qu'aucun défaut débouchant ou sous-jacent n'est présent.

Le rapporteur considère que la présence de défauts débouchants remplis d'oxydes en surface externe des calottes reste improbable pour les calottes supérieure et inférieure. En effet, bien que des opérations de traitement thermique de détensionnement ont eu lieu après les contrôles de ressuage réalisés lors de l'approvisionnement des calottes, leurs surfaces étaient usinées et sans rugosité pour piéger des oxydes.

Le rapporteur considère par ailleurs que les contrôles mis en œuvre sur la surface externe de la calotte inférieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville permettent de détecter ces défauts débouchants. Les résultats obtenus permettent de justifier l'absence de défauts nocifs. Par ailleurs, l'ASN a mandaté un organisme pour surveiller ces contrôles complémentaires. Dans ses rapports adressés à l'ASN, l'organisme n'a pas relevé de non-conformité dans l'application des procédures d'Areva NP.

Il faut noter que, pour la calotte supérieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville, l'ASN avait, dans sa lettre en référence [7], partagé le constat du fabricant « *selon lequel aucun contrôle complémentaire à ceux déjà réalisés, en lien avec la démarche de justification de la présence de ségrégation majeure positive, n'est envisageable sur le couvercle de cuve* ». Bien que le risque de présence de défauts débouchants est faible sur la calotte du couvercle de cuve du réacteur EPR de Flamanville, le rapporteur considère que l'absence de contrôle complémentaire de la surface externe de cette calotte n'a pas permis de vérifier l'absence de défauts débouchants, en particulier si ceux-ci sont remplis d'oxydes. La calotte supérieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville présente par conséquent un niveau de garantie d'absence de défauts de ce type moindre que la calotte inférieure.

3.3.3. Contrôles complémentaires de recherche de défauts sous revêtement des calottes

Le rapporteur considère que les contrôles réalisés pour détecter les défauts sous revêtement des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville sont adaptés pour la détection des défauts potentiellement initiés par les opérations de soudage du revêtement en acier inoxydable austénitique. L'ASN a mandaté un organisme pour surveiller ces contrôles. Dans ses rapports adressés à l'ASN, l'organisme n'a pas relevé de non-conformité dans l'application des procédures d'Areva NP. Le rapporteur considère que la présence de défauts de dimensions non conformes aux critères des spécifications techniques peut être écartée.

Le rapporteur note que, dans le cas du couvercle de la cuve du réacteur EPR de Flamanville, le contrôle n'a pas pu être réalisé sur la totalité de la paroi concernée (partie couverte de 92 %). Toutefois, l'ensemble de la zone potentiellement ségréguée a été contrôlée.

4. Caractérisation du matériau

4.1. Programme d'essais

Le programme d'essais, décrit dans le document en référence [13], vise à évaluer les propriétés mécaniques du matériau, nécessaires à l'analyse de la résistance mécanique des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville.

Il a principalement consisté à déterminer les propriétés de ténacité en zone de ségrégation majeure positive, afin de les comparer aux propriétés en zone de recette¹² et d'en tenir compte pour l'analyse du risque de rupture brutale. Il a nécessité préalablement de localiser et de déterminer l'étendue et la profondeur de la ségrégation majeure positive.

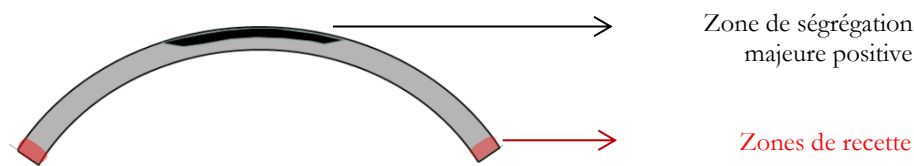


Figure 8 : Coupe d'une calotte – identification des zones de recette et de la zone ségrégée

Compte tenu du fait que des essais destructifs ne sont pas réalisables sur les calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville, puisqu'ils conduiraient à les rendre inutilisables, les essais destructifs du programme ont été réalisés sur des échantillons prélevés dans trois calottes sacrificielles, les calottes supérieures UA et UK et inférieure UA.

4.1.1. Programme réalisé par Areva NP

4.1.1.1. *Contenu du programme d'essais*

Le programme d'Areva NP présenté lors de la séance du GP ESPN du 30 septembre 2015 comprenait des essais sur la calotte supérieure UK et la calotte inférieure UA, avec des éprouvettes prélevées au quart de l'épaisseur et à mi-épaisseur, dans la zone de ségrégation majeure positive, et au quart de l'épaisseur en zone de recette. Le quart de l'épaisseur s'entend en partant de la surface externe des calottes, correspondant à la tête du lingot.

En outre, la carotte de matière prélevée au centre de la calotte supérieure UA, à l'origine de la découverte de l'anomalie en 2014 et du dossier de justification proposé par Areva NP, a été l'objet d'investigations complémentaires début 2016. La matière de cette carotte a été caractérisée sur toute sa hauteur grâce à des mesures de teneur en carbone par prélèvements de copeaux et des essais de résilience.

À la suite des premières mesures de carbone dans l'épaisseur des deux premières calottes sacrificielles, ainsi que des mesures de résilience à mi-épaisseur de la carotte centrale de la calotte supérieure UA, Areva NP a intégré au programme d'essais, en cours d'année 2016, la calotte supérieure UA. Les essais mécaniques ont de plus été étendus jusqu'aux trois quarts de l'épaisseur

¹² Zone définie par le référentiel utilisé pour la fabrication dans laquelle les propriétés mécaniques sont testées.

des calottes inférieure et supérieure UA¹³.

Les trois calottes sacrificielles ont fait l'objet des essais suivants pour chaque profondeur d'intérêt en zone de ségrégation majeure positive :

- des essais de résilience afin d'établir une courbe de transition et déterminer les températures de transition T_{CV}^{14} et T_{68J}^{14} ;
- des essais Pellini afin d'établir une température de transition T_{NDT}^{14} ;
- des essais de résilience complémentaires aux essais Pellini afin d'établir une température de transition RT_{NDT}^{14} ;
- des essais de ténacité dans le domaine de la transition fragile-ductile (éprouvettes CT12,5) afin de caractériser la ténacité en fonction de la température ;
- des essais de traction, associés aux essais de ténacité aux températures du domaine de transition ;
- des essais de ténacité dans le domaine ductile (éprouvettes CT25 testées à 50 °C, à la température des épreuves de requalification périodique et à 330 °C, température proche de la température de fonctionnement de la cuve du réacteur) afin d'évaluer la résistance à la déchirure ductile ;
- des essais de traction, associés aux essais de déchirure ductile, réalisés également à 50 °C et 330 °C ;
- des essais de traction à température ambiante afin de comparer les valeurs d'allongement à la rupture à la valeur de 20 % mentionnée au point 4 de l'annexe I de l'arrêté ESPN en référence [3].

Par ailleurs, des essais en zone de recette des trois calottes sacrificielles et des deux calottes destinées à la cuve du réacteur EPR de Flamanville ont été réalisés :

- des essais de résilience afin d'établir une courbe de transition ;
- des essais de ténacité et des essais de traction associés, nécessaires à l'interprétation des essais de ténacité.

Ces essais complètent les essais de recette initiaux (essais de traction, de résilience et Pellini au quart de l'épaisseur depuis la peau interne), réalisés lors de la fabrication de ces calottes, entre 2006 et 2013.

Le Tableau 9 synthétise la nature et le nombre d'essais du programme d'essais mené en 2016 par zone d'intérêt des calottes, et identifie les laboratoires où ont été réalisés les essais mécaniques et les analyses chimiques.

¹³ La calotte supérieure UK n'a pas été retenue en raison des teneurs en carbone aux trois quarts de l'épaisseur plus faibles que celles des calottes UA.

¹⁴ Cf. définition des sigles en p.13.

Calotte	Essais	Température	FA3 inf	FA3 sup	UK sup			UA inf				UA sup				Total par type d'essai
			Zone de recette	Zone de recette	Zone de recette	Zone ségrégée 1/4 ép	Zone ségrégée 1/2 ép	Zone de recette	Zone ségrégée 1/4 ép	Zone ségrégée 1/2 ép	Zone ségrégée 3/4 ép	Zone de recette	Zone ségrégée 1/4 ép	Zone ségrégée 1/2 ép	Zone ségrégée 3/4 ép	
Résilience (courbe de transition)	variable (dont 0°C)	18	18	18	72	52	18	36	36	36	18	36	36	36	430	
Résilience (pour RT _{NDR})	fonction de T _{NDR}	/	/	/	2x12	2x12	/	12	12	12	/	2x12	2x12	12	144	
Ténacité (ductile CT 25)	50 et 330°C	6	6	6	12	8	6	9	9	9	6	10	10	10	107	
Ténacité (fragile CT 12,5)	Variable	40	40	48	144	84	38	72	72	48	20	74	72	48	800	
Traction	50 et 330°C	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	136 + 9 en peau	
Traction	Ambiante	/	/	/	3	3	/	3	3	3	/	3	3	3		
Traction à T° de transition	Variable	6	6	6	14	6	6	6	6	6	6	6	6	6		
Pellini	Variable	/	/	/	2x8	2x8	/	8	8	8	/	2x8	2x8	8	96	
Analyse chimique		18	18	74	286	193	19	143	147	122	17	167	169	121	1503	
Total par zone (hors analyses chimiques)		72	72	80	287	195	70	148	148	124	52	171	169	125	1722	

	Centre technique AREVA GmbH à Erlangen (Allemagne)
	SCK.CEN à Mol (Belgique)
	AMEC (Royaume-Uni)
	AREVA NP à Saint Marcel
	FILAB à Dijon

Tableau 9 : Synthèse du programme d'essais par calotte et laboratoire

4.1.1.2. Préparation et caractérisation de la matière

Avant la réalisation des essais du programme mené par Areva NP, les opérations suivantes ont concerné les calottes sacrificielles :

- l'étendue de la zone de ségrégation majeure positive a été déterminée à partir de mesures de teneur en carbone réalisées en surface externe par spectrométrie d'émission optique ;
- les calottes ont été découpées en demi-calottes selon l'axe de la zone ségrégée ;
- la profondeur de la zone de ségrégation majeure positive a été déterminée par des macrographies et des mesures de teneur en carbone dans l'épaisseur des calottes sacrificielles par spectrométrie d'émission optique ;
- les zones ségrégées des demi-calottes ont été découpées en blocs de 400 mm x 400 mm ;
- les blocs ont été découpés en tranches positionnées aux différentes profondeurs d'intérêt (quart de l'épaisseur depuis la surface interne, mi-épaisseur et trois quarts de l'épaisseur) ;
- la surface des tranches a été caractérisée par mesures de teneur en carbone par spectrométrie d'émission optique, confirmées par des mesures obtenues sur des copeaux prélevés en certains points, caractérisés par combustion infrarouge, et confirmées par des macrographies, afin de définir le plan de prélèvement des éprouvettes dans chaque tranche.

La Figure 9 représente les différentes étapes de préparation de la matière d'une calotte sacrificielle en vue des essais de caractérisation des propriétés mécaniques.

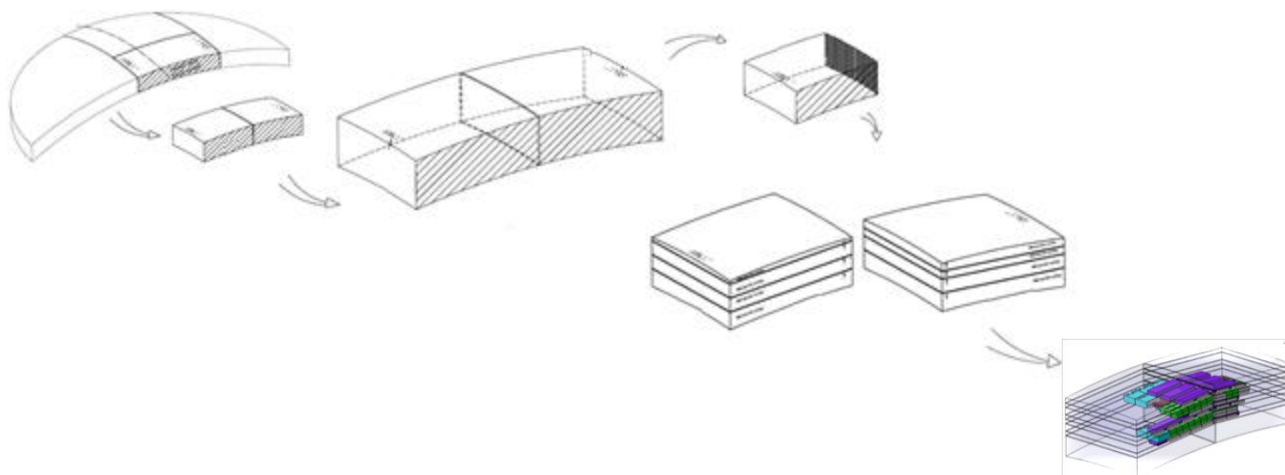


Figure 9 : Étapes de préparation d'une calotte du stade « demi-calotte » jusqu'au plan de prélèvement dans les tranches

La Figure 10 illustre la position des tranches aux différentes profondeurs d'intérêt avec la nature des essais associés à chaque tranche.

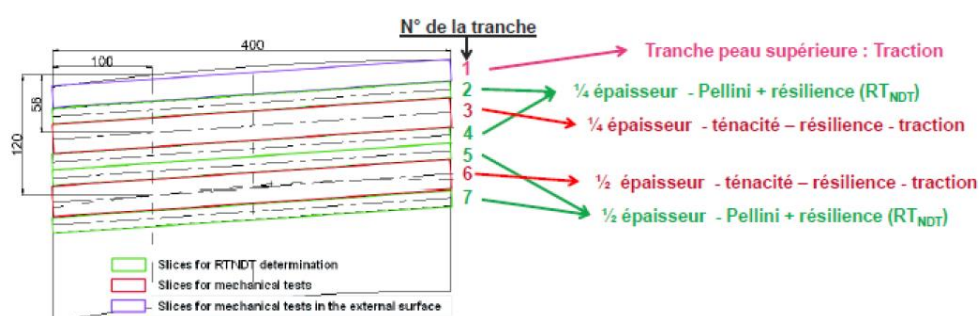


Figure 10 : Découpe des tranches dans les blocs de matière ségrégée (exemple : calotte supérieure UK)

La Figure 11 illustre la manière dont ont été définis les plans de prélèvement des éprouvettes d'essais à partir des macrographies et des cartographies de la teneur en carbone sur les tranches aux différentes profondeurs d'intérêt, en prenant le quart de l'épaisseur de la calotte supérieure UK en exemple. En Annexe 9, Annexe 10 et Annexe 11 figure l'ensemble des cartographies de teneur en carbone établies au cours du programme d'essais : en surface des cinq calottes, dans la profondeur des trois calottes sacrificielles et en surface des tranches aux différentes profondeurs d'intérêt.

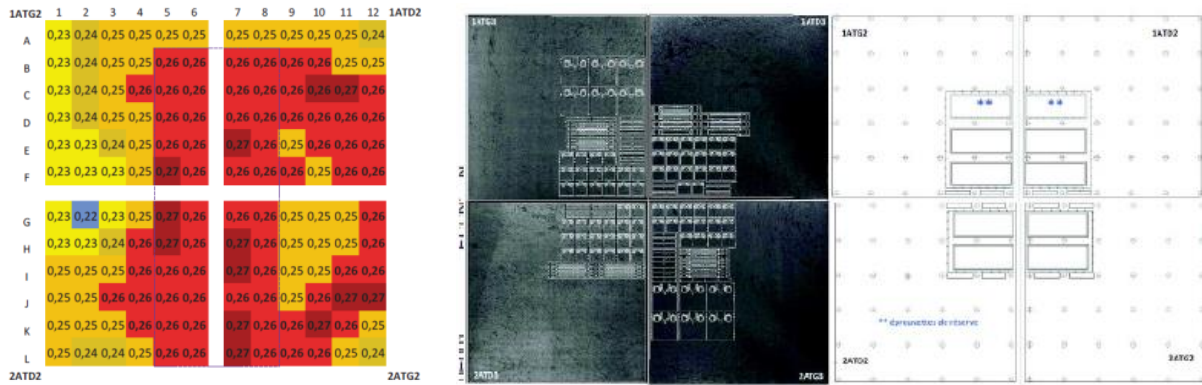


Figure 11 : Plan de prélèvement au quart de l'épaisseur de la calotte supérieure UK
Les valeurs mentionnées correspondent à la teneur en carbone (en %)

Enfin, la Figure 12 synthétise les opérations du programme d'essais mené par Areva NP, de la caractérisation de la zone de ségrégation majeure positive jusqu'au stockage de la matière restante à l'issue du programme, ainsi que leur localisation et les sites industriels et les laboratoires intervenus dans le programme. Certaines opérations ont été sous-traitées par les entités mentionnées, telles que des opérations de découpe et d'usinage, des mesures de teneur en carbone par spectrométrie d'émission optique et les expertises fractographiques.

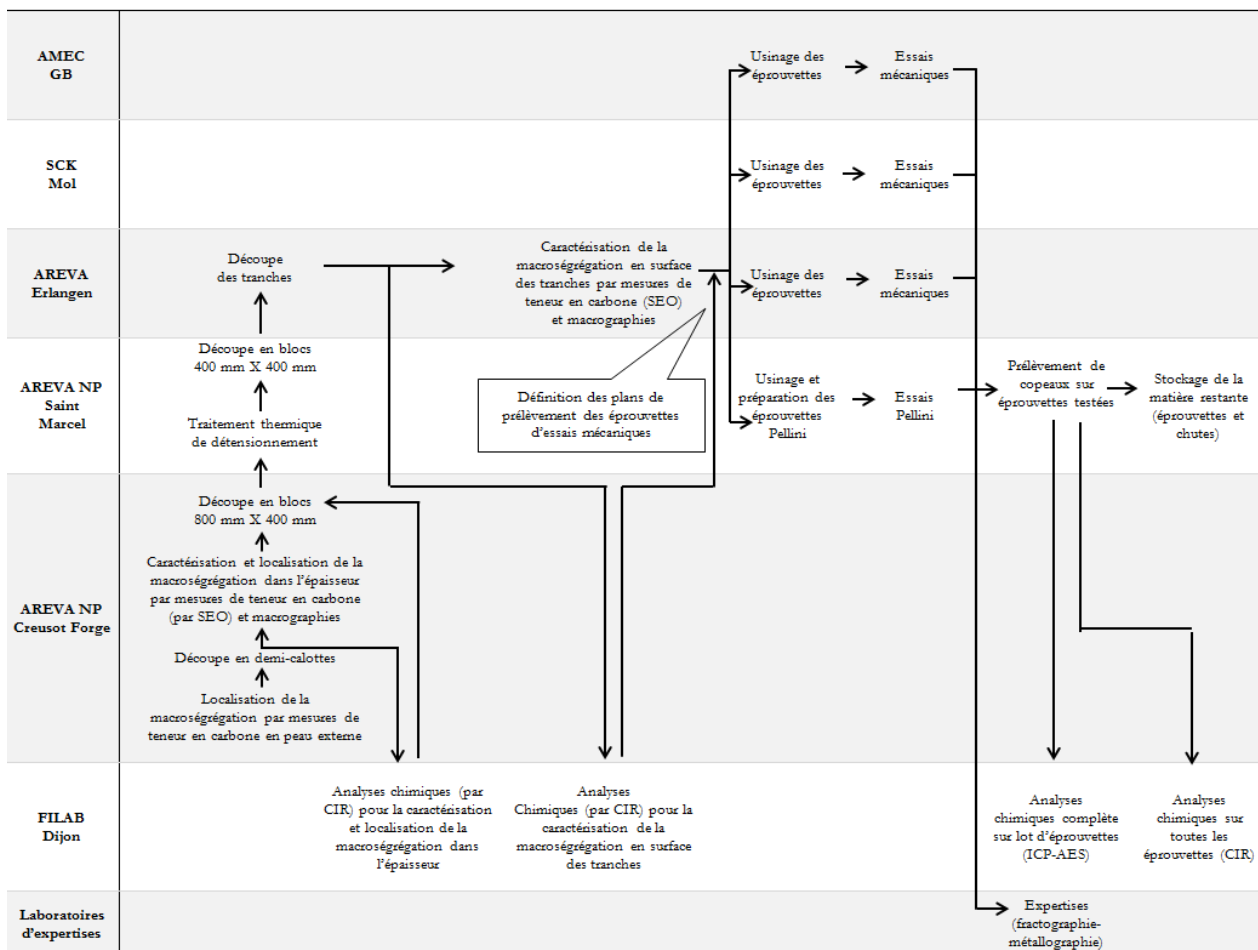


Figure 12 : Déroulement du programme d'essais sur les calottes sacrificielles

4.1.1.3. Choix des laboratoires d'essais et d'expertises

Areva NP a eu recours à trois laboratoires accrédités selon la norme NF EN ISO/CEI 17025, dont deux indépendants du groupe Areva NP, pour réaliser les essais de caractérisation des propriétés mécaniques :

- le centre technique Areva GmbH à Erlangen en Allemagne ;
- le SCK.CEN à Mol en Belgique ;
- le laboratoire AMEC au Royaume-Uni.

Les essais Pellini ont été réalisés par l'usine d'Areva NP de Saint-Marcel afin de garantir des conditions de mise en œuvre en milieu industriel identiques, et selon la même édition de la norme ASTM E208 (édition de 1975 exigée par le code RCC-M et peu pratiquée en laboratoire), pour tous les essais ayant fourni des résultats exploités dans le dossier.

Les expertises métallographiques et fractographiques ont été réalisées dans les trois laboratoires en charge des essais mécaniques et sept autres laboratoires, dont quatre indépendants du groupe Areva NP :

- Areva NP à Saint-Marcel ;
- Centre technique Areva NP au Creusot ;
- Centre technique Areva NP à Saint-Marcel ;
- CRMC Arcelor Mittal au Creusot ;
- Bureau Veritas Laboratoires à Saint-Ouen l'Aumône ;
- Bureau Veritas Laboratoires à Pessac ;
- Filab à Dijon.

4.1.1.4. Méthodes de mesure de la teneur en carbone

Areva NP a fait appel à deux techniques de mesure de teneur en carbone pour la caractérisation de la ségrégation majeure positive des calottes, dont les incertitudes ont été estimées selon la méthode décrite dans le document en référence [12] :

- la spectrométrie d'émission optique (SEO)¹⁵ réalisée directement sur les calottes : Areva NP évalue l'incertitude de cette technique portative à $\pm 15 \%$ pour les appareils et la procédure du prestataire externe retenu, et à $\pm 10 \%$ pour l'appareil et la procédure utilisés par des intervenants d'Areva NP ;
- la combustion infrarouge (CIR)¹⁶ : pour cette technique nécessitant de prélever des copeaux de matière analysés ensuite par le laboratoire indépendant Filab, l'incertitude des mesures réalisées est évaluée à $\pm 5 \%$.

Par ailleurs, la teneur en carbone a été mesurée sur chaque éprouvette par combustion infrarouge sur copeaux par le laboratoire externe Filab.

Le laboratoire Filab est accrédité selon la norme NF EN ISO/CEI 17025 pour réaliser les analyses chimiques par combustion infrarouge, ainsi que pour les analyses chimiques complètes réalisées sur un lot d'éprouvettes, par la technique ICP-AES¹⁷, technique de référence, dans le but

¹⁵ Cette technique, non invasive, est basée sur la sublimation de la matière produisant un spectre lumineux dont les longueurs d'onde sont caractéristiques de l'élément chimique considéré, et dont l'intensité lumineuse est liée à la concentration de l'élément chimique contenu dans l'acier.

¹⁶ Cette technique, localement invasive, est basée sur la combustion du matériau et la mesure des gaz produits par absorption infrarouge.

¹⁷ Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy : spectrométrie d'émission atomique avec plasma couplé par induction.

de vérifier la corrélation de la teneur des autres éléments d'alliage avec celle du carbone.

4.1.1.5. Vieillessement thermique

Areva NP estime que les calottes supérieure et inférieure de cuve 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 du haut du cœur du réacteur, 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 potentiel de l'acier des calottes sont donc le vieillissement sous déformation et le vieillissement thermique qui conduisent à une diminution dans le temps de la ténacité. Cet abaissement peut être exprimé par un décalage de la RT_{NDT} par rapport à la RT_{NDT} initiale.

Le phénomène de vieillissement thermique est dû à la diffusion du phosphore aux joints de grains, ce qui fragilise les joints de grains et augmente ainsi la température de transition fragile-ductile. EDF a réalisé une synthèse des connaissances sur le vieillissement thermique dû à la diffusion aux joints de grains d'éléments fragilisants, en référence [32].

Sur la base de ce bilan de connaissances, Areva NP et EDF estiment qu'un décalage forfaitaire de la RT_{NDT} de +15 °C couvre l'effet du vieillissement thermique et du vieillissement sous déformation sur les propriétés de ténacité de l'acier des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville pour 60 ans de fonctionnement.

Areva NP et EDF ont néanmoins proposé de mener un programme de suivi du comportement en température d'échantillons prélevés dans une zone de ségrégation majeure positive, afin de disposer des premiers résultats équivalents à 60 ans de fonctionnement au moment de la première visite décennale du réacteur EPR de Flamanville.

Ce programme d'essais, en référence [33], consiste à établir, à partir d'éprouvettes de résilience prélevées dans la matière ségrégée des calottes supérieure et inférieure UA (en peau externe pour la calotte supérieure et à mi-épaisseur pour la calotte inférieure), des courbes de transition dans le domaine de la transition fragile-ductile.

Trois éprouvettes sont testées à chacune des six températures d'essai prédéfinies, dans un état de référence (non vieilli) et à l'état vieilli pour les deux calottes testées.

L'état vieilli est obtenu via un traitement thermique de vieillissement accéléré, à une température de 375 °C, supérieure à la température de fonctionnement, ne dépassant pas 330 °C. Le temps de vieillissement équivalent à 60 ans de fonctionnement est estimé par EDF à 39 000 heures, soit inférieur à 4,5 ans.

Les éprouvettes de résilience seront prélevées dans des zones contenant le taux de phosphore maximal relevé dans le programme d'essais des calottes sacrificielles, soit de l'ordre de 0,008 %.

4.1.2. Position du rapporteur

4.1.2.1. *Contenu du programme d'essais*

Caractérisation de la ségrégation majeure positive

La caractérisation et le programme d'essais ont été similaires pour les trois calottes sacrificielles, conformément à l'engagement n° 5 d'Areva NP du courrier en référence [26].

Le rapporteur considère que le processus de caractérisation des calottes mis en œuvre par Areva NP via des mesures de teneur en carbone selon différents plans, avec des méthodes de mesure dont les incertitudes de mesure ont été estimées, a permis de définir de façon suffisante et satisfaisante la répartition spatiale (position et étendue) de la ségrégation majeure positive et sa teneur maximale en carbone.

Caractère suffisant du programme au regard de l'objectif de caractérisation du matériau

L'étendue de la zone de ségrégation majeure positive sur les trois calottes sacrificielles a permis à Areva NP de prélever le nombre d'éprouvettes visé, sans restriction. En particulier, malgré une épaisseur plus faible, des éprouvettes d'essais Pellini ont finalement pu être prélevées sur la calotte inférieure UA.

Il n'y a pas eu d'éprouvette prélevée aux trois quarts de l'épaisseur de la calotte supérieure UK en raison des teneurs en carbone plus faibles (inférieures à 0,20 %) que celles des calottes UA à cette profondeur (de l'ordre de 0,26 %).

Le rapporteur considère qu'Areva NP a engagé dans le programme d'essais un nombre d'éprouvettes suffisant pour :

- déterminer la courbe de transition et les températures de transition T_{CV} et T_{68j} de chacune des calottes sacrificielles ;
- déterminer la température de transition T_{NDT} de chacune des calottes sacrificielles ;
- déterminer la température de transition RT_{NDT} de chacune des calottes sacrificielles ;
- évaluer la résistance à la déchirure ductile de chacune des calottes sacrificielles ;
- déterminer la température de transition issue d'essais de ténacité de chacune des calottes sacrificielles.

Le caractère suffisant du programme d'essais est également analysé au regard de l'interprétation des résultats d'essais dans le paragraphe 4.3.8.

Traitement thermique

Les coupons d'essais des trois calottes sacrificielles ont reçu un traitement thermique de détensionnement simulé équivalent à celui réellement subi par les calottes de cuve du réacteur EPR de Flamanville, conformément à l'engagement n° 6 d'Areva NP du courrier en référence [26].

Positionnement des éprouvettes

Aux étapes de préparation des calottes jusqu'à la définition des plans de prélèvement des éprouvettes ont été associés des points d'arrêt réguliers que l'ASN a levés après analyse des éléments transmis par Areva NP, conformément aux demandes n° 5 et 6 de la lettre de l'ASN en

référence [7]. Le rapporteur considère que les éprouvettes ont été prélevées au cœur de la matière ségréguée et permettent de caractériser ses propriétés mécaniques, ce que les analyses chimiques réalisées sur chaque éprouvette testée ont permis de confirmer.

4.1.2.2. *Choix des laboratoires d'essai*

Le rapporteur note que :

- conformément à la demande n° 7 de la lettre de l'ASN en référence [7], Areva NP a eu recours à un laboratoire indépendant du groupe Areva NP et accrédité selon la norme NF EN ISO/CEI 17025 pour réaliser les analyses chimiques par combustion infrarouge ainsi que pour les analyses chimiques complètes réalisées par la technique ICP-AES sur copeaux ;
- conformément à la demande n° 8 de la lettre de l'ASN en référence [7], Areva NP a eu recours à trois laboratoires accrédités selon la norme NF EN ISO/CEI 17025, dont deux indépendants du groupe Areva NP, pour réaliser les essais mécaniques.

Dans le cadre du programme d'essais, le laboratoire d'Areva GmbH à Erlangen a réalisé :

- les essais sur la zone ségréguée de la calotte supérieure UK ;
- les essais au quart de l'épaisseur de la calotte supérieure UA ;
- la totalité des essais de déchirure ductile en zone ségréguée des trois calottes sacrificielles.

Le rapporteur n'a pas relevé d'incohérence dans les résultats des essais réalisés par le laboratoire d'Areva GmbH, en comparaison avec les résultats obtenus par les deux laboratoires indépendants du groupe Areva NP.

Le rapporteur ne remet pas en cause le choix d'Areva NP de confier à un même laboratoire la totalité des essais de déchirure ductile compte tenu du fait que les laboratoires SCK.CEN et AMEC n'étaient pas en capacité de réaliser les essais à 330 °C.

L'ASN a réalisé une inspection inopinée au sein du laboratoire d'Areva GmbH à Erlangen en Allemagne, portant sur les conditions techniques et d'organisation mises en œuvre pour la réalisation des essais mécaniques confiés à ce laboratoire par Areva NP. Aucun point majeur n'a été relevé dans la mise en œuvre des essais et dans la gestion du laboratoire (lettre de suite de l'inspection de l'ASN en référence [27]).

Quant aux essais Pellini, le rapporteur ne remet pas en cause le choix d'Areva NP de les confier à l'usine d'Areva NP à Saint-Marcel, afin de garantir des conditions de mise en œuvre des essais similaires pour tous les résultats présentés dans le dossier. L'ASN a réalisé une inspection portant sur la préparation des éprouvettes et la réalisation des essais Pellini dans l'usine d'Areva NP de Saint-Marcel, et a relevé un écart sans impact sur le dossier (lettre de suite de l'inspection de l'ASN en référence [28]).

En outre, les étapes du processus décrites sur la Figure 12 ont été surveillées par un organisme mandaté par l'ASN. Ce point est détaillé au paragraphe 4.1.3 du présent rapport.

4.1.2.3. *Évaluation des incertitudes de mesure de la teneur en carbone*

Le rapporteur considère recevables les valeurs d'incertitude associées aux mesures de la teneur en carbone qu'Areva NP a retenues dans son dossier.

Le rapporteur précise que ces incertitudes sont propres aux techniques, appareils et procédures évalués par Areva NP. Par conséquent, ces résultats ne peuvent être généralisés à toute autre configuration non couverte par les évaluations menées par Areva NP.

4.1.2.4. Vieillessement thermique

L'étude de l'effet du vieillissement thermique s'appuyant sur l'évolution des propriétés de résilience est une pratique établie et conforme à l'état de l'art. Le rapporteur considère par conséquent que le décalage de température de transition obtenu à partir d'un programme d'essais est un indicateur pertinent pour évaluer le vieillissement thermique, et ainsi la ténacité minimale du matériau.

Dans le cadre des études sur le vieillissement thermique, la température de transition utilisée de manière conventionnelle est le TK_{50J} (température correspondant à une énergie de flexion par choc de 56 joules). Par conséquent, EDF propose d'exploiter les résultats des essais de résilience du programme de vieillissement en considérant le TK_{50J} . Afin de permettre la comparaison de ces résultats avec les essais de résilience réalisés dans le cadre du programme d'essais des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville, EDF s'engage à mettre à disposition les valeurs de TK_{50J} correspondant aux courbes de transition des calottes sacrificielles [79]. Le rapporteur considère cet engagement satisfaisant.

Le rapporteur considère suffisants le nombre d'éprouvettes et le nombre de courbes de transition, à la température de vieillissement choisie par EDF, pour établir le décalage des propriétés de ténacité lié au vieillissement thermique. Le nombre d'éprouvettes est notamment équivalent à ce qui est pratiqué pour suivre le comportement de l'acier de cuve en zone irradiée. Par ailleurs, le choix des pièces sacrificielles pour prélever les éprouvettes n'appelle pas de commentaire du rapporteur, dans la mesure où il est en premier lieu conditionné par la teneur en phosphore, reconnu comme étant le contributeur principal du phénomène de vieillissement thermique.

Le rapporteur considère que la température d'essai de vieillissement accéléré choisie par EDF de 375 °C permet d'obtenir de premiers résultats avant la première visite décennale du réacteur EPR de Flamanville sans s'éloigner de façon importante de la température de fonctionnement. Cependant, le vieillissement thermique sur un matériau de cuve fortement ségrégué n'a jamais été étudié. Ainsi, une extension du programme à une température plus proche de la température de fonctionnement permettrait de confirmer que les phénomènes métallurgiques ayant lieu lors du vieillissement accéléré sont bien représentatifs des phénomènes postulés aux températures de fonctionnement.

Le rapporteur considère que le programme de vieillissement thermique doit être complété avec un lot d'éprouvettes de résilience vieilleses thermiquement à une température aussi proche que possible des conditions de fonctionnement du réacteur et dans tous les cas inférieure à 350 °C, toutes les autres conditions d'essais (calottes sacrificielles concernées et protocole de détermination des courbes de transition) étant équivalentes au programme proposé à 375 °C.

En complément du programme proposé à une température de vieillissement de 375 °C pendant environ 4,5 ans, EDF s'est engagée, à la demande du rapporteur, à prélever 18 éprouvettes complémentaires dans la calotte sacrificielle supérieure UA en peau externe permettant la réalisation d'une courbe de transition du domaine fragile - ductile à partir d'essais de résilience. Ces éprouvettes seront soumises à un traitement de vieillissement à

une température de 350 °C pendant environ 17 ans [79]. La courbe de transition de résilience du matériau vieilli sera établie à la même échéance [79]. Le rapporteur considère cet engagement satisfaisant.

4.1.3. Surveillance du programme d'essais par un organisme mandaté par l'ASN

4.1.3.1. *Objectifs et modalités de la surveillance*

L'organisme Bureau Veritas Exploitation¹⁸ a été mandaté par l'ASN pour évaluer le respect des modalités et les conditions de réalisation du programme d'essais mené par Areva NP sur les différentes calottes, ainsi que pour les mesures de la teneur en carbone sur les calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville. Bureau Veritas Exploitation est habilité par l'ASN pour réaliser ce type de surveillance. Cette habilitation a été délivrée à la suite d'un audit et le respect des conditions d'habilitation sont régulièrement inspectées par l'ASN.

Le champ des mandats confiés à Bureau Veritas Exploitation comportait des revues documentaires et une surveillance sur le terrain.

Les revues documentaires ont porté sur :

- l'analyse de l'impact des évolutions des normes d'essais utilisées par Areva NP ;
- la vérification de la portée d'accréditation des laboratoires ;
- la vérification de la cohérence des documents techniques produits par Areva NP avec les documents de principe transmis à l'ASN (plans de prélèvement des éprouvettes notamment) ;
- la traçabilité des résultats dans la documentation (cohérence des procès-verbaux des laboratoires avec les opérations réalisées, et cohérence des résultats d'essais reportés dans les dossiers d'Areva NP).

La surveillance sur le terrain, présentée en détail au paragraphe 4.1.3.2, a été réalisée sur l'ensemble des sites où la matière du programme d'essais a été présente (représentation en Figure 12), selon des règles d'échantillonnage validées par l'ASN.

Cette surveillance sur le terrain a porté sur :

- la vérification métrologique des équipements de mesure impliqués dans le programme ;
- la vérification de la qualification des opérateurs impliqués dans la réalisation des essais ;
- la vérification du respect des normes appelées par la documentation applicable au programme ;
- la vérification du respect des conditions et des modalités d'application du programme, selon la documentation applicable au programme (déroulement des opérations, conservation de la matière au cours du programme et stockage final) ;
- la vérification de la traçabilité et de la conservation de la matière (chutes et éprouvettes).

¹⁸ L'entité Bureau Veritas Exploitation réalisant la surveillance du programme d'essais est distincte de l'entité Bureau Veritas Laboratoires citée au paragraphe 4.1.1.3.

En outre, lorsque des écarts ont été identifiés, Bureau Veritas Exploitation s'est prononcé sur :

- le traitement des écarts détectés par Areva NP et ses sous-traitants ;
- les réponses apportées par Areva NP lors du traitement des écarts détectés par Bureau Veritas Exploitation.

Le rapporteur a examiné le bilan de cette surveillance à travers les rapports émis par Bureau Veritas Exploitation de surveillance des opérations réalisées par Areva NP sur la carotte centrale de la calotte supérieure UA en référence [30], et sur les calottes sacrificielles en référence [31].

4.1.3.2. Bilan quantitatif de la surveillance

Les taux de surveillance par calotte et par opération sont indiqués dans le Tableau 10. Les opérations ont pour la grande majorité été suivies à 100 %.

Pour les analyses chimiques réalisées dans un laboratoire indépendant sur la matière en zone ségréguée, le taux de surveillance a été modifié en fin de programme, sur proposition justifiée de Bureau Veritas Exploitation et avec l'accord de l'ASN. La surveillance des expertises des éprouvettes a quant à elle été réalisée par échantillonnage, avec l'accord de l'ASN.

	Zone de recette					Zone ségréguée		
	FA3 sup	FA3 inf	UK sup	UA sup	UA inf	UK sup	UA sup	UA inf
Caractérisation de la zone ségréguée	-	-	-	-	-	100 %	100 %	100 %
Identification / Traçabilité des coupons	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
Traitement thermique de détensionnement des coupons	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
Traçabilité / découpes des éprouvettes	À chaque report de marquage et de poinçon					100 %	100 %	100 %
Essais de traction	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
Essais de résilience	100 %	100 %	100 %	100 %	100 % (*)	100 %	100 %	100 %
Essais de ténacité dans le domaine fragile-ductile (CT 12,5)	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 % des essais + une préfissuration minimum par jour		
Essais de ténacité dans le domaine ductile (CT25)	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %			
Contrôle dimensionnel des éprouvettes	Surveillance des côtes importantes + vérification du PV							
Essais Pellini	Non concernés car réalisés lors de la fabrication					100 %	100 %	100 %
Prélèvements de copeaux	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
Analyses chimiques	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 % puis contrôle inopiné hebdomadaire		

(*) à l'exception de 3 éprouvettes

Tableau 10 : Taux de surveillance du programme d'essais

Le bilan quantitatif de la surveillance menée par Bureau Veritas Exploitation, par nature de geste, est indiqué dans le Tableau 11. Les écarts entre calottes sont dus à des différences sur les quantités d'éprouvettes engagées dans le programme d'essais.

Calotte concernée par la surveillance	Préparation et rapportage (h.j)	Gestion (h.j)	Inspection terrain (h.j)	Total par calotte (h.j)
UA sup	250	304	291	845
UA inf	151	307	233	691
UK sup	126	248	185	559
FA3 inf	20	30	23	73
FA3 sup	26	44	40	110

Tableau 11 : Estimation chiffrée de la surveillance par Bureau Veritas Exploitation (en homme.jour)

4.1.3.3. Traitement des écarts

Le bilan quantitatif des écarts ouverts par Areva NP et ses sous-traitants, et des fiches d'observation et de non-conformité ouvertes par Bureau Veritas Exploitation, figure dans le Tableau 12.

Site	Écarts détectés par le fabricant/sous-traitant soumis à l'organisme	Fiches d'observation ouvertes par Bureau Veritas Exploitation	Fiche de Non-Conformité ouvertes par Bureau Veritas Exploitation
Areva Creusot Forge	1	1	0
Areva St Marcel	10	12	1
Laboratoire Areva NP Erlangen (Allemagne) et ses sous-traitants	15	5	0
Laboratoire SCK Mol (Belgique) et ses sous-traitants	13	4	2
Laboratoire AMEC GB et ses sous-traitants	23	3	0
Laboratoire Filab à Dijon	0	1	0
Laboratoire du centre technique Areva NP du Creusot	0	2	0
Bureau Veritas Laboratoires (Pessac et Saint-Ouen-L'Aumône)	0	1	0
Flamanville	0	1	0

Tableau 12 : Bilan des écarts traités par Bureau Veritas Exploitation

Tous les écarts ouverts par Areva NP et ses sous-traitants ont été examinés par Bureau Veritas Exploitation et le rapporteur qui ont considéré que le traitement de chacun d'entre eux est approprié.

L'ensemble des fiches d'observation et fiches de non-conformité a été soldé.

4.1.3.4. Avis de Bureau Veritas Exploitation

Bureau Veritas Exploitation a émis un avis satisfaisant sur l'ensemble des points de la surveillance, en faisant toutefois part de réserves qui ont été traitées et jugées sans impact sur le dossier par le rapporteur.

4.1.4. Position du rapporteur sur la mise en œuvre du programme d'essais

Bureau Veritas Exploitation a assuré sa mission de surveillance du programme d'essais mené par Areva NP conformément aux exigences des mandats qui lui ont été confiés par l'ASN. Ainsi le rapporteur considère que la confiance acquise par la surveillance du programme d'essais réalisée par Bureau Veritas Exploitation se reporte sur les résultats présentés par Areva NP.

Le rapporteur considère que la surveillance assurée par Bureau Veritas Exploitation et les inspections réalisées par l'ASN apportent des garanties techniques et d'impartialité quant au respect de la documentation applicable, à la traçabilité, à la réalisation des essais dans le respect des règles de l'art et à l'exactitude des résultats du programme d'essais mené par Areva NP sur les cinq calottes de cuve.

4.2. Représentativité des calottes sacrificielles par rapport à celles de la cuve du réacteur EPR de Flamanville

4.2.1. Principes de la démarche d'Areva NP d'analyse de la représentativité des calottes sacrificielles

La démarche d'analyse de la représentativité des calottes sacrificielles par rapport à celles de la cuve du réacteur EPR de Flamanville est présentée par Areva NP dans les documents en références [11] et [12]. L'objectif de cette démarche est d'identifier les paramètres qui influencent la résistance à la rupture brutale de tels composants et d'en étudier les variations entre les calottes sacrificielles et celles de la cuve du réacteur EPR de Flamanville.

Parmi l'ensemble des facteurs influençant la résistance à la rupture brutale de tels composants, Areva NP met en évidence deux facteurs prépondérants dans les domaines fragile et de la transition fragile-ductile :

- la teneur en carbone. Les propriétés de ténacité diminuent lorsque cette teneur augmente ;
- l'effet de trempe, caractérisé par la vitesse de refroidissement entre 800 °C et 600 °C lors de l'immersion dans l'eau de la bêche de trempe après austénitisation. Plus la vitesse de trempe est élevée, meilleurs sont l'effet de trempe et les propriétés de ténacité pour ce type d'acier.

Areva NP a identifié, sans les retenir, d'autres facteurs impactant la résistance à la rupture brutale :

- les autres éléments d'addition que le carbone, influençant la trempabilité. La teneur de ces éléments évoluant de façon concomitante avec la teneur en carbone au sein d'une zone de ségrégation majeure positive, Areva NP s'est concentré exclusivement sur la teneur en carbone ;
- la taille de grain austénitique, influençant également la trempabilité. Areva NP considère que les plages imposées de température et de durée d'austénitisation suffit à prévenir une variation significative entre calottes ;
- la ségrégation du phosphore aux joints de grains, influençant le vieillissement thermique en service. Areva NP considère que la teneur en phosphore à la coulée atteint des valeurs très faibles pour toutes les calottes, au point que l'impact de cet élément est secondaire pour ce qui concerne la ténacité et que les variations de concentration sont négligeables.

Les deux facteurs prépondérants étant définis, Areva NP a étudié les paramètres ayant une influence sur leur amplitude, et les a comparés afin d'évaluer la représentativité des calottes sacrificielles par rapport aux calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville.

Ces paramètres, décrits dans les paragraphes suivants, peuvent être classés en trois catégories, selon la nature des garanties qu'ils apportent :

- les éléments documentaires, tels que les enregistrements des paramètres de fabrication ;
- les éléments évalués par simulation numérique ;
- les données expérimentales, issues d'essais physiques réalisés au moment de la fabrication ou dans le cadre du programme d'essais sur les calottes sacrificielles.

4.2.2. Paramètres influençant la teneur en carbone

4.2.2.1. Éléments documentaires et évalués par simulation numérique

Concernant les paramètres pouvant influencer la teneur en carbone et, de manière plus large, le maximum du taux de ségrégation et le positionnement de la zone ségrégée, Areva NP a étudié les paramètres de fabrication suivants pour les trois calottes sacrificielles et les deux calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville :

- les paramètres de coulée et de solidification du lingot ;
- les paramètres et données de forgeage et d'emboutissage ;
- les paramètres d'usinage (enlèvements de matière).

Paramètres de coulée et de solidification du lingot

Ces paramètres sont :

- la masse du lingot ;
- la masse de la masselotte et le taux de masselottage¹⁹ ;
- la masse des poches de coulée ;
- la vitesse de coulée ;
- la durée d'application des poudres exothermiques ;
- la durée de refroidissement des lingots ;
- la profondeur de retassure²⁰ ;
- les teneurs à la coulée des différents éléments chimiques (carbone, manganèse, silicium, molybdène, soufre, phosphore, vanadium, nickel, chrome).

	FA3 sup		UA sup		UK sup	
	Requis	Réalisé	Requis	Réalisé	Requis	Réalisé
C	0,20 % max	0,18 %	0,20 % max	0,18 %	0,20 % max	0,19 %
Mn	1,15-1,55 %	1,55 %	1,20-1,50 %	1,46 %	1,15-1,55 %	1,57 %
P	0,008 % max	0,003 %	0,008 % max	0,004 %	0,008 % max	0,005 %
S	0,005 % max	0,001 %	0,005 % max	0,001 %	0,005 % max	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 % max	0,17 %	0,25 % max	0,18 %	0,25 % max	0,16 %
Mo	0,45-0,55 %	0,51 %	0,45-0,55 %	0,49 %	0,45-0,55 %	0,52 %
V	0,01 % max	0,001 %	0,01 % max	0,005 %	0,01 % max	0,001 %
Cu	0,10 % max	0,04 %	0,10 % max	0,04 %	0,10 % max	0,06 %
Al	0,04 % max	0,02 %	0,04 % max	0,01 %	0,04 % max	0,01 %
Co	0,03 % max	0,01 %	0,03 % max	0,01 %	0,03 % max	0,01 %
H ₂	1,5 ppm max	0,95 ppm	1,5 ppm max	0,94 ppm	1,5 ppm max	1,10 ppm

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

¹⁹ Proportion de la masse de la masselotte par rapport à la masse totale du lingot.

²⁰ Cavité formée en tête du lingot, due à la contraction du métal lors de la solidification.

	FA3 inf		UA inf	
	Requis	Réalisé	Requis	Réalisé
C	0,20 % max	0,18 %	0,20 % max	0,18 %
Mn	1,15-1,55 %	1,55 %	1,20-1,50 %	1,58 %
P	0,008 % max	0,004 %	0,008 % max	0,005 %
S	0,005 % max	0,001 %	0,005 % max	0,001 %
Si	0,10-0,30 %	0,18 %	0,15-0,30 %	0,18 %
Ni	0,50-0,80 %	0,75 %	0,50-0,80 %	0,71 %
Cr	0,25 % max	0,14 %	0,25 % max	0,16 %
Mo	0,45-0,55 %	0,51 %	0,45-0,55 %	0,51 %
V	0,01 % max	0,001 %	0,01 % max	0,001 %
Cu	0,10 % max	0,04 %	0,10 % max	0,06 %
Al	0,04 % max	0,02 %	0,04 % max	0,01 %
Co	0,03 % max	0,01 %	0,03 % max	0,009 %
H ₂	1,5 ppm max	0,95 ppm (cf. § 7.2)	1,5 ppm max	1,07 ppm (cf. § 7.2)

Tableau 14 : Comparaison des compositions chimiques à la coulée des calottes inférieures FA3 et UA

	Calottes supérieures			Calottes inférieures	
	FA3	UA	UK	FA3	UA
Type de lingot	Plein	Plein	Plein	Plein	Plein
Type de lingotière	2550	2550	2550	2550	2550
Poids de lingot	156,9 t	157,1 t	158,6 t	157,4 t	158,5 t

Tableau 15 : Paramètres essentiels de coulée et de solidification des calottes supérieures FA3, UA et UK, et inférieures FA3 et UA

La comparaison des paramètres de coulée et de solidification des différents lingots permet à Areva NP de conclure à l'absence d'écart susceptible de conduire à des différences significatives du taux maximum de ségrégation et de répartition de la zone ségrégée dans le volume des lingots coulés.

Les paramètres et données de forgeage et d'emboutissage

Ces paramètres sont :

- la gamme de forgeage ;
- la durée cumulée des périodes lors desquelles la pièce est chaude ;
- l'épaisseur dans l'axe du flan brut de forge ;
- la longueur et le poids de chutes en tête et pied ;
- le taux de corroyage²¹ ;
- l'emboutissage.

La comparaison des conditions de forgeage et d'emboutissage montre que la phase de bondardage²² a conduit pour la calotte supérieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville à une épaisseur plus faible au niveau de l'axe du flan brut, en raison d'un enfoncement de l'outil de forge plus important.

²¹ Rapport des longueurs d'un élément du métal après et avant l'opération de forgeage (ex : hauteur initiale / hauteur finale lors d'une opération d'écrasement).

²² Le bondardage est l'opération d'écrasement de la pièce en son centre au moyen d'un outil de forge appelé bondard.

Areva NP montre, par des simulations de forgeage, que les conséquences de cette opération sont faibles à la fois sur la profondeur de la ségrégation (la teneur en carbone choisie comme indicateur est atteinte à 50 % de l'épaisseur du flan dans le cas de référence, contre 56 % dans le cas de la calotte supérieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville) et sur l'extension radiale de la ségrégation (le diamètre estimé de la zone de ségrégation majeure positive est de 927 mm pour le cas de référence, contre 1036 mm dans le cas de la calotte supérieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville).

Les paramètres relatifs à l'enlèvement de matière

Ces paramètres sont définis à partir des épaisseurs éliminées :

- par le chutage en tête et en pied du lingot (cf. Tableau 16) ;
- par les pertes au feu ;
- par l'usinage du flan avant emboutissage, avant traitement thermique de qualité et pour la mise au profil final de livraison.

	Calottes supérieures			Calottes inférieures	
	FA3	UA	UK	FA3	UA
Chutage tête	20 %	19,7 %	18,2 %	20 %	19,7 %
Chutage pied	9 %	8,5 %	10 %	8 %	8,5 %

Tableau 16 : Taux de chutage des calottes supérieures FA3, UA et UK, et inférieures FA3 et UA

Areva NP met en évidence que l'élimination de matière par usinage est un paramètre influent pour la position des ségrégations majeures résiduelles dans les calottes. En comparant les paramètres de fabrication, Areva NP montre qu'il existe une certaine variabilité entre les différentes calottes des épaisseurs de matière enlevées aux différents stades de la fabrication.

Par conséquent Areva NP s'est attachée à faire apparaître les différentes épaisseurs de matière enlevée sur un bloom²³ de référence, ce qui permet, au final, de visualiser l'emplacement théorique de la matière des pièces finies dans ce bloom. Areva NP a choisi d'estimer l'altitude des pièces finies à l'étape du bloom car il s'agit du premier stade de fabrication présentant une géométrie simple permettant de comparer les différentes pièces.

Estimation de l'altitude des pièces finies dans un bloom de référence

Dans le bloom de référence, Areva NP a délimité la région où se trouvait, à ce stade d'élaboration, la matière qui se retrouve dans chaque calotte au stade final de réalisation (après forgeage et usinage). Ce travail vise à permettre la comparaison de l'altitude de la matière des différentes calottes sur la base de ce bloom de référence. La hauteur utile du bloom de référence a été définie conformément au programme technique de fabrication des calottes et est identique pour toutes les calottes.

L'estimation de l'altitude des pièces finies dans le bloom tient compte de :

- l'élimination de matière par les opérations de chutage et d'usinage à différents stades ;
- la perte de matière au feu ;
- la prise en compte d'incertitudes qu'Areva NP a évaluées à partir de la documentation de fabrication.

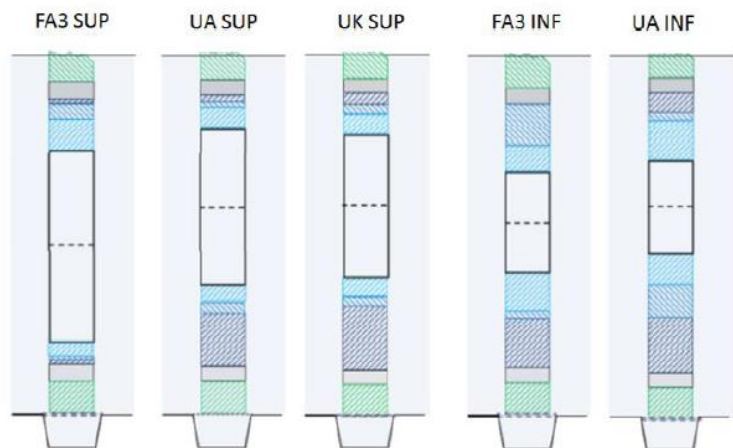
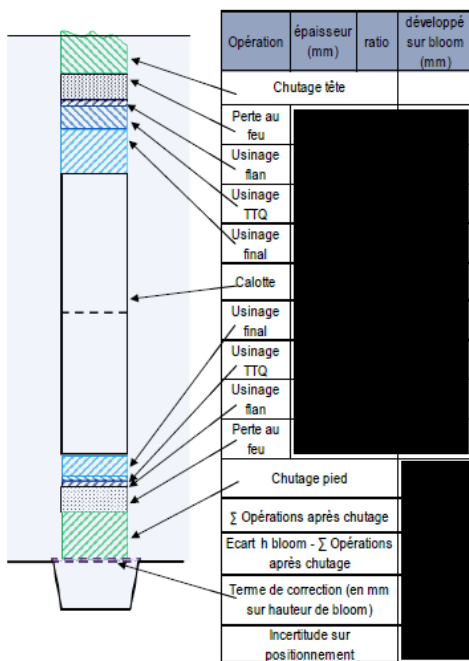
²³ Un bloom est un état intermédiaire de la pièce, entre le lingot (après coulée) et la pièce forgée à l'état final, obtenu après une opération de forgeage visant à lui procurer un diamètre constant sur toute sa hauteur.

La Figure 13 représente les différentes épaisseurs considérées afin de déterminer l'altitude et l'étendue de la calotte supérieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville dans le bloom de référence. La Figure 14 permet de comparer le positionnement relatif des différentes calottes dans ce même bloom. Ces figures ne rendent compte que du positionnement axial (altitude) de la partie centrale de la pièce finale. Areva NP n'a pas représenté la pièce dans sa totalité car le positionnement de la zone périphérique d'une calotte est plus compliqué à reconstituer à cause des opérations de forge subies par cette zone. De plus, l'étendue latérale présente un intérêt moindre pour le dossier, la zone de ségrégation maximale se trouvant au centre de la calotte.

L'écrasement plus important pratiqué en zone centrale de la calotte supérieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville conduit à ce que cette calotte occupe par conséquent une hauteur plus importante que les autres. Toutefois, les usinages réalisés aboutissent à une position de la pièce plus basse dans le bloom.

Compte tenu d'usinages plus importants pratiqués, les calottes inférieures sont globalement dans une position plus favorable s'agissant de l'élimination de la ségrégation majeure positive de tête.

Par conséquent, Areva NP conclut que le positionnement des calottes sacrificielles apparaît comme plus pénalisant pour la présence de ségrégations positives résiduelles du carbone que celui des calottes supérieure et inférieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville.



Hauteur utile du bloom de référence : 4660 mm
 Incertitude sur le positionnement : ± 250 mm

Figure 13 : Exemple de reconstitution du positionnement (FA3 sup)

Figure 14 : Positionnement des différentes calottes dans le bloom de référence

4.2.2.2. Données expérimentales

Comparaison des teneurs en carbone en zone de recette

Les différentes teneurs en carbone mesurées en zone de recette (ainsi que les valeurs à la coulée pour rappel) sont présentées dans le Tableau 17. Ces valeurs tiennent compte de la totalité des éprouvettes testées dans le cadre du programme d'essais.

Areva NP considère que les taux de carbone en zone de recette des deux calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville ne les singularisent pas par rapport aux trois calottes sacrificielles.

Calotte	Teneurs en carbone				
	Coulée	Mesures réalisées en recette			
		Nombre d'éprouvettes	Valeur de recette max	Valeur de recette min	Valeur de recette médiane
UK sup	0,187 %	78	0,179 %	0,169 %	0,175 %
UA inf	0,179 %	25	0,177 %	0,172 %	0,174 %
UA sup	0,182 %	17	0,191 %	0,175 %	0,183 %
FA3 sup	0,182 %	18	0,179 %	0,175 %	0,178 %
FA3 inf	0,181 %	26	0,194 %	0,177 %	0,185 %

Tableau 17 : Comparaison des teneurs de carbone à la coulée et sur éprouvettes testées en zone de recette

Comparaison des cartographies surfaciques de teneur en carbone

Areva NP a comparé les mesures de teneur en carbone réalisées en surface des calottes sacrificielles et des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville. Ces valeurs ont été obtenues à partir de plusieurs campagnes de mesure, impliquant différentes techniques et plusieurs appareils de mesure.

Les différentes cartographies surfaciques de teneur en carbone de chaque calotte sont présentées en Annexe 9.

L'analyse des mesures nécessitant une connaissance robuste des incertitudes liées aux techniques utilisées, Areva NP a mis en œuvre :

- une méthodologie d'évaluation des incertitudes des techniques de mesure (cf. paragraphe 4.1.1.4) ;
- un post-traitement des cartographies de teneur en carbone en surface externe selon une approche géostatistique.

Les teneurs en carbone mesurées en face interne, lors de la fabrication et dans le cadre des investigations menées en 2016, sont présentées dans le Tableau 18.

Calotte	UK sup	UA inf	UA sup	FA3 sup	FA3 inf
Mesure par CIR (*) (lors de la fabrication)	0,19 %	0,18 %	0,19 %	0,17 %	0,16 %
Mesure maximale par technique SEO réalisée en 2016	0,18 %	0,21 %	0,19 %	Pas de mesure réalisée à cause de la présence du revêtement	

(*) sur copeau prélevé dans l'anneau de recette

Tableau 18 : Mesures de teneur en carbone en surface interne

Les teneurs en carbone maximales mesurées en surface externe (par la technique SEO portable²⁴ sur les calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville, et par SEO et CIR²⁵ sur les calottes sacrificielles), où se situe la zone de ségrégation majeure positive, figurent dans le Tableau 19, complétées par les valeurs post-traitées par deux prestataires d'Areva NP.

Calotte	UK sup	UA inf	UA sup	FA3 sup	FA3 inf	Écart
Appareil et procédure Areva NP	0,294 %	0,317 %	0,296 %	0,314 %	0,298 %	0,023 %
Post-traitement géostatistique n° 1 : maximum	0,291 %	0,312 %	0,296 %	0,307 %	0,298 %	0,021 %
Post-traitement géostatistique n° 1 : max + 2 écarts-types	0,301 %	0,319 %	0,317 %	0,321 %	0,310 %	0,021 %
Post-traitement géostatistique n° 2 : valeur maximale	0,279 %	0,286 %	0,294 %	0,288 %	0,297 %	0,018 %

Tableau 19 : Mesures de teneur en carbone maximale en surface externe et estimation statistique du maximum à partir des cartographies surfaciques

À partir de ces valeurs, Areva NP conclut que :

- l'incertitude sur la valeur maximale est réduite par l'approche géostatistique, elle varie entre 3 % et 5 %, ou 3 % et 7 %, selon le prestataire ;
- les valeurs maximales se trouvent dans une plage de variabilité de 0,02 % (soit 10 % en taux de ségrégation) pour les deux prestataires. Areva NP considère donc qu'il y a une bonne cohérence entre les calottes ;
- les valeurs maximales de la teneur en carbone en surface sont très proches, autour de 0,32 %, incertitudes comprises ;
- avec l'approche du premier prestataire, qui tient compte de toutes les valeurs extrêmes de la distribution des mesures²⁶, le taux de ségrégation en surface des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville est couvert par les valeurs obtenues sur les calottes sacrificielles, hors incertitudes. La valeur de la calotte supérieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville apparaît la plus élevée pour les valeurs tenant compte des incertitudes, en raison de deux valeurs de mesure très excentrées de la distribution ;
- avec l'approche du second prestataire qui élimine les points de mesure hauts et isolés, le taux de ségrégation maximal en surface de la calotte inférieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville apparaît le plus élevé.

²⁴ Spectrométrie d'émission optique, voir paragraphe 4.1.1.4.

²⁵ Combustion infrarouge de copeaux, voir paragraphe 4.1.1.4.

²⁶ La prise en compte des valeurs de carbone très élevées et isolées a notamment un impact fort sur l'estimation des valeurs environnantes.

4.2.3. Paramètres influençant l'effet de trempe

4.2.3.1. Éléments documentaires et analytiques

Concernant l'effet de trempe, Areva NP a étudié les paramètres de fabrication suivants, pour les trois calottes sacrificielles et les deux calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville :

- l'épaisseur de la pièce au stade du traitement thermique de qualité, puis après usinage au profil final ;
- les conditions de réalisation de l'opération de traitement thermique de trempe : le temps de transfert entre le four et la bache de trempe, le type de fluide de trempe, la température du fluide de trempe, et l'agitation du bain réalisée pendant la trempe.

	Calottes supérieures			Calottes inférieures	
	FA3	UA	UK	FA3	UA
Temps d'austénitisation avant trempe	7 h 36	7 h 25	7 h 13	8 h 17	7 h 10
Temps de transfert entre le four et la bache de trempe	7 min	5 min	6 min	5 min	5 min

Tableau 20 : Paramètres de trempe des calottes supérieures FA3, UA et UK, et inférieures FA3 et UA

Épaisseurs

Le Tableau 21 récapitule pour les calottes du programme d'essais, en zone centrale du composant, l'épaisseur au stade du traitement thermique de qualité, ainsi que les usinages en faces interne et externe pour obtention du profil final.

	Calotte	UK sup	UA inf	UA sup	FA3 sup	FA3 inf
Sur l'axe des pièces	Épaisseur lors du traitement thermique de qualité					
	Épaisseur usinée en face interne après traitement thermique de qualité					
	Épaisseur usinée en face externe après traitement thermique de qualité					
	Épaisseur finale	232 mm	147 mm	232 mm	232 mm	147 mm

Tableau 21 : Épaisseurs usinées après traitement thermique de qualité

Conditions de réalisation de l'opération de traitement thermique

Pour ce qui concerne les conditions de réalisation de l'opération de traitement thermique, Areva NP indique que :

- toutes les calottes ont été trempées à l'eau ;
- la température du fluide de trempe n'a pas d'impact significatif, étant donné l'écart important entre la température du fluide et la température d'intérêt de la pièce pour ce qui concerne la performance de la trempe (environ 700 °C) ;
- il n'est pas attendu d'impact des conditions d'agitation lors de la trempe sur la qualité des pièces ;
- les temps de transfert entre le four et la bache de trempe pour les cinq calottes sont

homogènes (de 5 à 7 minutes) et très inférieurs au temps maximal défini dans le programme technique de fabrication (20 minutes).

Areva NP a ensuite utilisé les données de fabrication (température et durée d'austénitisation, temps de transfert entre le four et la bache de trempe, conditions de réalisation de l'opération de trempe et épaisseurs au stade embouti avant traitement thermique) comme données d'entrée d'un calcul thermique de la vitesse de refroidissement après austénitisation.

Vitesses de refroidissement obtenues par simulation numérique

Sur la base des dimensions indiquées dans le Tableau 21, Areva NP a réalisé des calculs thermiques de la phase de transfert du four à la bache de trempe, puis de l'opération de trempe, sur des modèles à deux dimensions.

La Figure 15 présente la comparaison de l'évolution de la vitesse de refroidissement entre les calottes inférieures (dont l'épaisseur de trempe est de 250 mm) et supérieures (290 mm), en fonction de la distance à la surface de trempe, c'est-à-dire avant les usinages finaux.

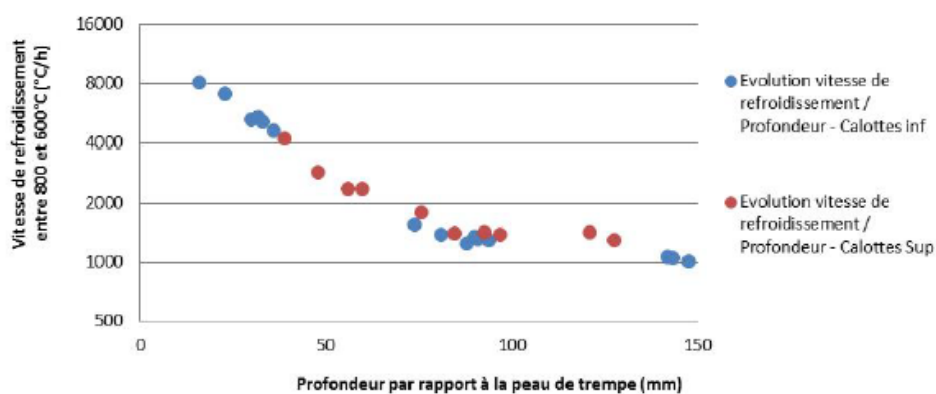


Figure 15 : Résultats des simulations numériques des opérations de trempe : évolution de la vitesse de refroidissement lors de la trempe en fonction de la distance à la surface

Malgré la différence des épaisseurs de trempe, Areva NP considère que les vitesses de trempe n'apparaissent pas significativement différentes, à même distance par rapport à la surface de trempe.

Le Tableau 22 présente les résultats de vitesse de refroidissement obtenus par simulation à chaque profondeur d'intérêt déterminée après prise en compte des usinages finaux.

	Calotte	UK sup	UA inf	UA sup	FA3 sup	FA3 inf
Vitesse de refroidissement entre 800 °C et 600 °C sur profil final de la pièce	Peau externe					
	¼ épaisseur externe					
	Mi-épaisseur					
	¼ épaisseur peau interne					
	Peau interne					

Tableau 22 : Vitesses de refroidissement entre 800 °C et 600 °C pour les profondeurs caractéristiques

La Figure 16 présente les résultats de vitesse de refroidissement obtenus pour les différentes calottes de cuve, sur la totalité de l'épaisseur des calottes.

Areva NP constate que, quelles que soient les pièces, les vitesses de refroidissement à cœur (entre le quart de l'épaisseur externe et le quart de l'épaisseur interne des pièces) évoluent peu. Selon ces résultats, Areva NP conclut toutefois que la calotte inférieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville apparaît dans une situation plus favorable que les autres calottes, pour ce qui concerne le quart de l'épaisseur depuis la peau externe.

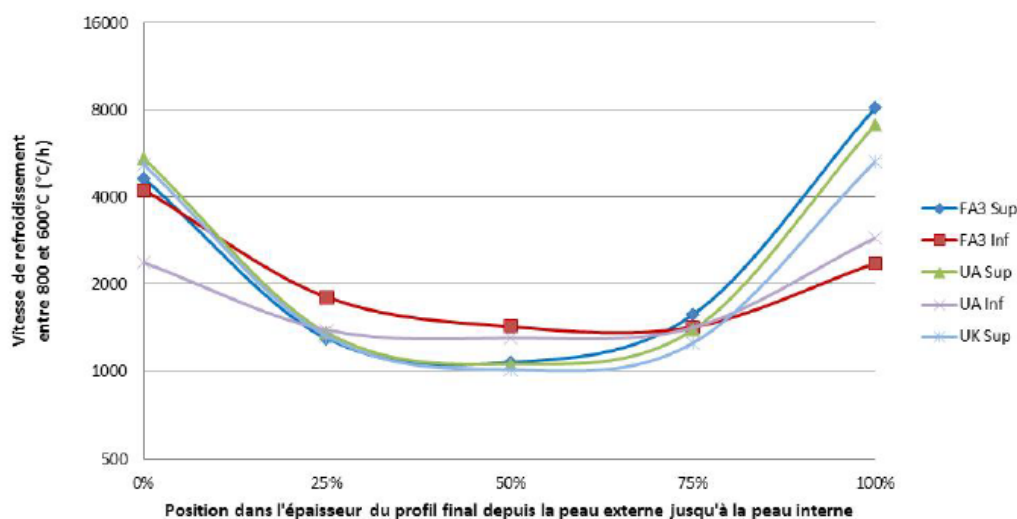


Figure 16 : Résultats des simulations numériques des opérations de trempage : évolution de la vitesse de refroidissement lors de la trempage au travers de l'épaisseur des calottes

4.2.3.2. Données expérimentales

Caractéristiques mécaniques en zone de recette

Areva NP a comparé les caractéristiques mécaniques des calottes sacrificielles et des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville, déterminées en zone de recette au moment de leur fabrication. Puis, dans le cadre du programme d'essais mené en 2016, Areva NP a déterminé les propriétés de résilience et de ténacité de ces différentes calottes en zone de recette.

Les propriétés de traction et de résilience (résultats d'essais Charpy et RT_{NDT}), déterminées dans le cadre des essais de recette lors de la fabrication, sont présentées dans le Tableau 23.

Calotte	UK sup	UA inf	UA sup	FA3 sup	FA3 inf
$R_{p0,2\%}$ moyen à T_{ambiante}	472 MPa	469 MPa	481 MPa	457 MPa	486 MPa
R_m moyen à T_{ambiante}	613 MPa	608 MPa	626 MPa	600 MPa	622 MPa
A % min à T_{ambiante}	26 %	24 %	26 %	25 %	24 %
RT_{NDT}	-45 °C	-30 °C	-35 °C	-30 °C	-20 °C
KV moyen à 0 °C	214 J	246 J	238 J	184 J	234 J

Tableau 23 : Propriétés mécaniques en zone de recette extraites du rapport de fin de fabrication

Areva NP considère que ces valeurs correspondent à celles attendues pour ce type de matériau. Bien que la calotte supérieure FA3 présente les propriétés de traction et de résilience les plus faibles parmi les cinq calottes du programme, Areva NP considère qu'elles restent représentatives des valeurs attendues et sont comparables aux valeurs obtenues lors des essais de recette sur les viroles de cœur des cuves des projets de réacteurs EPR finlandais, anglais et français provenant d'un autre fournisseur.

Les propriétés de résilience déterminées en zone de recette dans le cadre du programme d'essais sont présentées dans le Tableau 24.

Calotte	UK sup	UA inf	UA sup	FA3 sup	FA3 inf
T_{68J} (*)	-55 °C	-68 °C	-48 °C	-40 °C	-50 °C
KV palier ductile	214 J	225 J	218 J	223 J	213 J

(*) T_{68J} est la température issue de la courbe de transition Charpy pour laquelle l'énergie de résilience moyenne vaut 68 J

Tableau 24 : Caractéristiques de résilience en zone de recette

La Figure 17 représente les courbes de transition en zone de recette au quart de l'épaisseur des calottes depuis la peau interne au profil final.

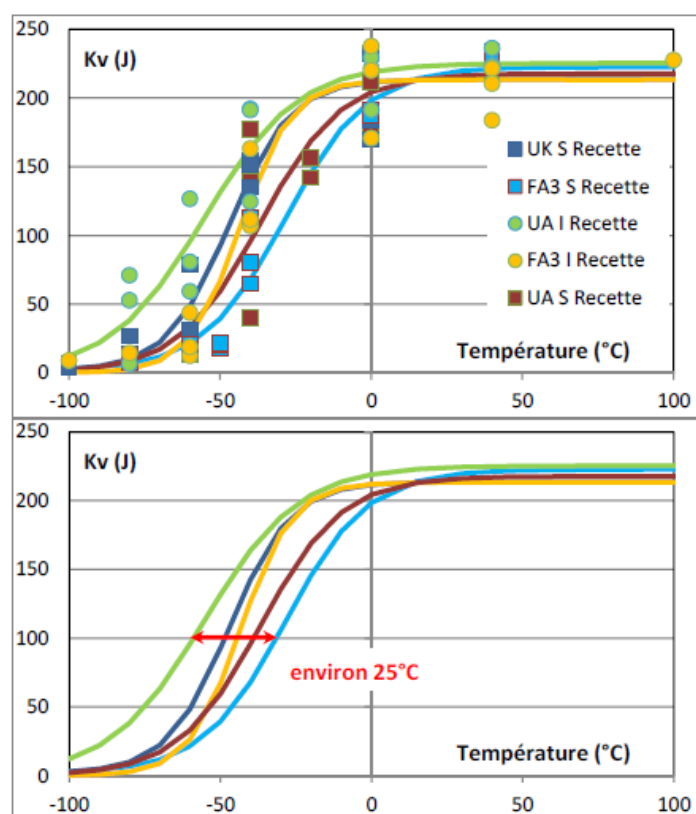


Figure 17 : Courbes de transition en zone de recette

Areva NP considère que les propriétés de résilience déterminées en zone de recette dans le cadre du programme d'essais sont cohérentes avec les propriétés relevées lors des essais de recette en fabrication. Areva NP considère également que ces valeurs correspondent à celles attendues pour ce type de matériau.

Les températures de transition issues des essais de ténacité réalisés en zone de recette dans le cadre du programme sur calottes sont présentées dans le Tableau 25.

Calotte	UK sup	UA inf	UA sup	FA3 sup	FA3 inf
$T_{env}^{(*)}$	-96 °C	-133 °C	-132 °C	-75 °C	-109 °C
$T_0^{(**)}$	-115 °C	-134 °C	-126 °C	-94 °C	-126 °C

(*) T_{env} est la température d'indexation de la courbe de l'annexe ZG du code RCC-M permettant d'envelopper de manière optimale l'ensemble des résultats d'essais de ténacité (Figure 18)

(**) T_0 est la température de référence définie selon la norme ASTM E1921

Tableau 25 : Températures de transition issues des essais de ténacité en zone de recette

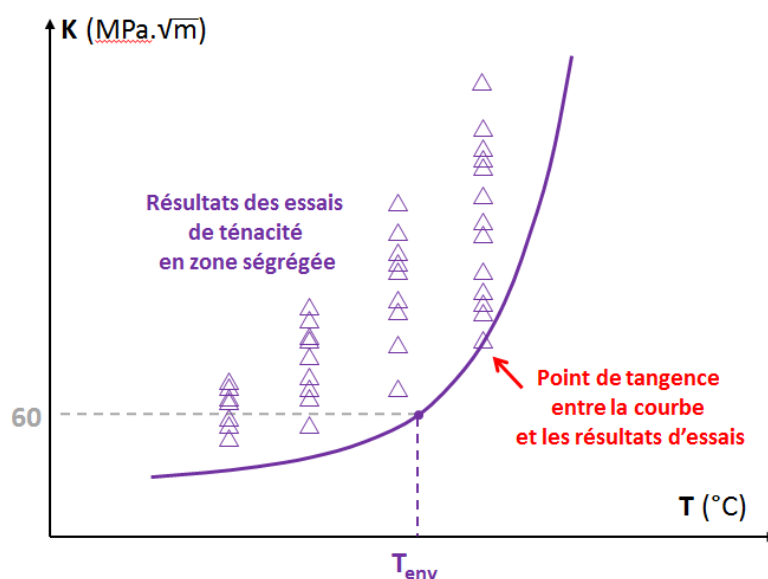


Figure 18 : Principe de détermination de T_{env}

Areva NP considère que la variation des températures T_0 est représentative de la variabilité des propriétés liée au processus de fabrication.

Sur l'ensemble des calottes testées, en zone de recette, la calotte supérieure du réacteur EPR de Flamanville conduit à la valeur de température T_0 la plus élevée, avec une valeur de -94 °C à comparer à la valeur la plus faible de -134 °C (calotte inférieure UA). Areva NP considère que cette valeur est révélatrice d'excellentes propriétés de ténacité au regard des valeurs habituellement rencontrées pour ce type de matériau.

Areva NP conclut que la comparaison des propriétés mécaniques de recette ne met pas en évidence de différence significative entre les différentes calottes et confirme, d'après ses estimations obtenues par calcul, la similitude et la performance de la trempe pour les différentes calottes du programme d'essais et pour les calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville.

4.2.4. Études complémentaires réalisées par Areva NP

4.2.4.1. *Analyses d'incertitudes et statistiques*

L'utilisation de mesures de teneur en carbone nécessitant une connaissance robuste des incertitudes liées aux techniques de mesure, Areva NP a mis en œuvre diverses analyses complémentaires, déjà mentionnées plus haut au paragraphe 4.1.1.4 :

- une méthodologie d'évaluation des incertitudes des techniques de mesure de teneur en carbone ;
- un post-traitement géostatistique²⁷ (par krigeage²⁸) des cartographies de teneur en carbone en surface externe, afin d'apprécier et de minimiser les incertitudes associées au champ de mesures.

Areva NP a également réalisé un post-traitement par krigeage des teneurs en carbone dans l'épaisseur des calottes sacrificielles, afin de vérifier que les teneurs maximales en surface externe sont supérieures aux teneurs maximales dans l'épaisseur. Areva NP constate statistiquement à partir des valeurs mesurées que la teneur en carbone est croissante de la peau interne vers la peau externe, comme attendu.

4.2.4.1. *Comparaison des teneurs en carbone dans la profondeur des calottes sacrificielles*

Au travers du programme d'essais, Areva NP a réalisé des mesures de carbone :

- à différentes profondeurs, dans les calottes sacrificielles (voir Annexe 10) ;
- sur chacune des éprouvettes, prélevées sur toutes les calottes et testées dans le cadre du programme d'essais ;
- en peau externe de toutes les calottes.

Areva NP a représenté les valeurs de teneur en carbone maximales observées à différentes profondeurs sur les calottes sacrificielles en fonction de leur positionnement axial dans les pièces. Ces valeurs ont ensuite été projetées dans le référentiel du bloom de référence des calottes (voir paragraphe 4.2.2.1), afin de pouvoir les comparer entre elles dans un référentiel commun.

La teneur en carbone, en ordonnée, est exprimée :

- en valeur absolue sur la Figure 19 ;
- en valeur relative à la teneur en carbone à la coulée (taux de ségrégation) sur la Figure 20 ;
- en valeur relative à la valeur médiane de la teneur en carbone des éprouvettes prélevées en zone de recette sur la Figure 21.

²⁷ La géostatistique est l'étude de phénomènes spatialisés (ainsi que temporels) dans un cadre mathématique probabiliste. Cette méthode d'analyse permet d'estimer des quantités là où elles n'ont pas été mesurées et de quantifier l'incertitude associée. La géostatistique a initialement été développée dans le cadre d'estimation de gisements miniers, puis de caractérisation de réservoirs pétroliers. Son domaine d'application est désormais élargi à tout phénomène spatialisé.

²⁸ Le krigeage est une méthode géostatistique qui permet de réaliser une interpolation spatiale de la teneur en carbone locale.

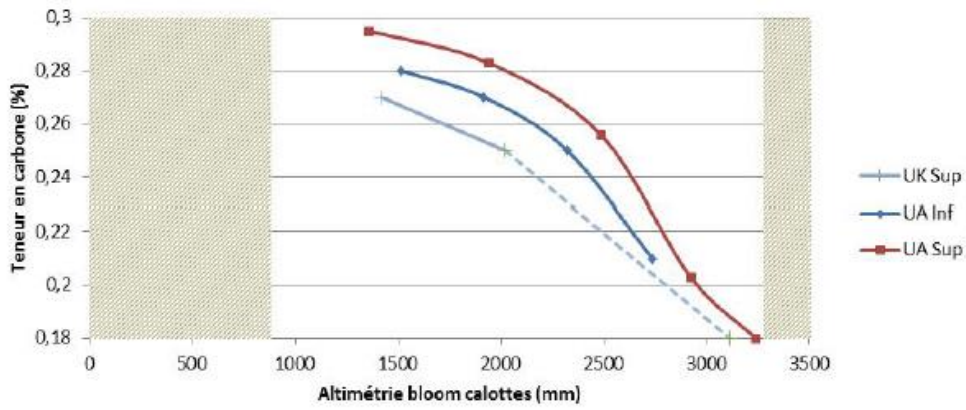


Figure 19 : Évolution de la teneur en carbone maximale

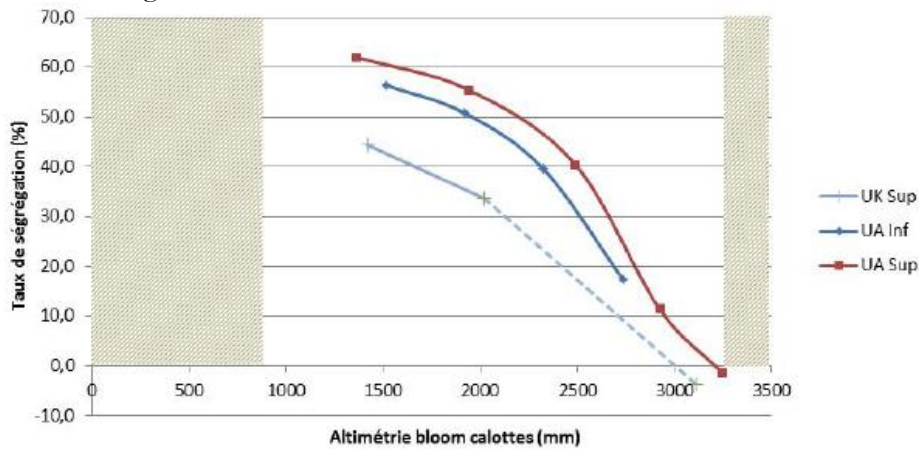


Figure 20 : Évolution du taux de ségrégation maximal (teneur en carbone relative à la coulée)

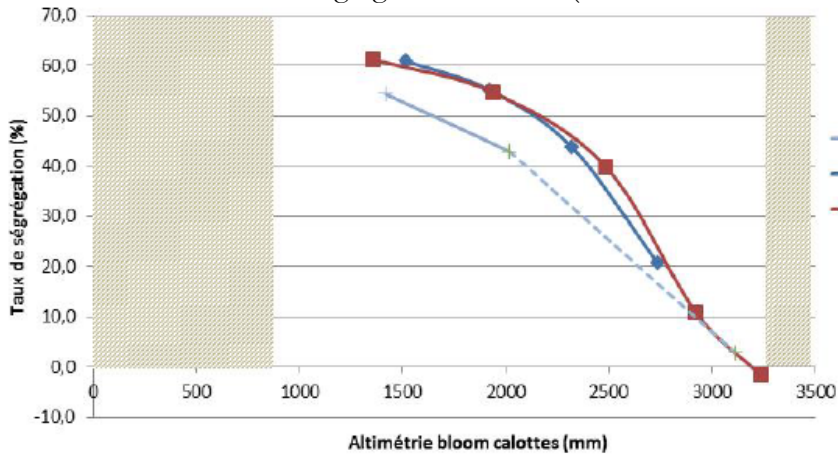


Figure 21 : Évolution du taux de ségrégation maximal (teneur en carbone relative à la valeur médiane de recette)

Sur ces figures, Areva NP constate une allure générale identique avec une diminution régulière sur des hauteurs équivalentes. Ces tendances sont identiques quel que soit le choix de représentation, taux de ségrégation ou valeur absolue de la teneur en carbone.

Areva NP constate également une certaine dispersion entre les trois calottes sacrificielles. Areva NP a réalisé des analyses de variabilité des deux paramètres de représentation que sont le positionnement dans le bloom de référence des calottes (en abscisse sur la Figure 22) et le taux de ségrégation (en ordonnée sur la Figure 22), afin de montrer que les incertitudes de ces deux paramètres (représentées simultanément sous forme de rectangles dans la Figure 22) permettent d'expliquer les différences observées entre les différentes calottes. De plus, Areva NP constate que, même en prenant en compte la variabilité des deux paramètres de représentation, le taux de ségrégation en peau interne des calottes supérieures est nominal.

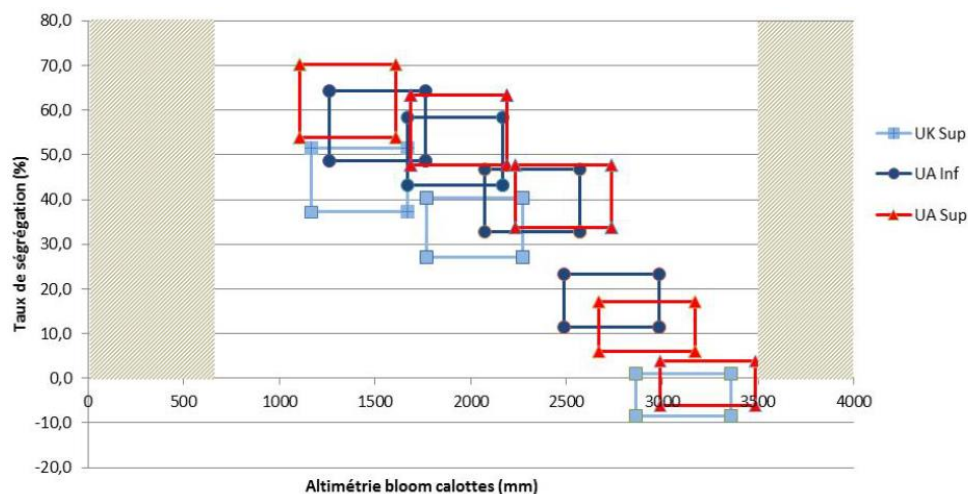


Figure 22 : Évolution de la teneur en carbone maximale des calottes sacrificielles avec prise en compte des incertitudes

4.2.4.2. Comparaison au bloom de R&D MOPPEC

Afin de disposer d'informations complémentaires, Areva NP a analysé de façon plus approfondie un bloom déjà étudié dans le cadre d'une étude de recherche et développement (dénommé bloom MOPPEC²⁹) et a comparé les teneurs en carbone mesurées sur ce bloom et les teneurs en carbone dans l'épaisseur des calottes sacrificielles.

La comparaison a été effectuée en représentant les profils de teneur en carbone (convertie en taux de ségrégation) dans l'épaisseur des calottes sacrificielles en fonction de l'altitude dans le bloom MOPPEC (Figure 23), après avoir converti les caractéristiques géométriques des calottes dans le repère du bloom MOPPEC.

La représentation des profils de taux de ségrégation du bloom MOPPEC, majorés et minorés compte tenu des incertitudes, sur la Figure 23, a été construite à partir de mesures et d'études réalisées sur ce bloom, à savoir :

- des cartographies de la teneur en carbone sur un plan de coupe passant par le diamètre du bloom réalisées avec un pas de mesure variable afin de privilégier les zones de ségrégation majeure positive ;
- une estimation des incertitudes à prendre en compte dans l'étude de ce bloom à partir d'un post-traitement géostatistique par krigeage, afin de construire des évolutions représentatives d'un encadrement maximal et minimal (nommées « géovariances majorée et minorée » sur la Figure 23).

²⁹ MOPPEC : « Modèle de prédiction des propriétés des pièces écrasées ».

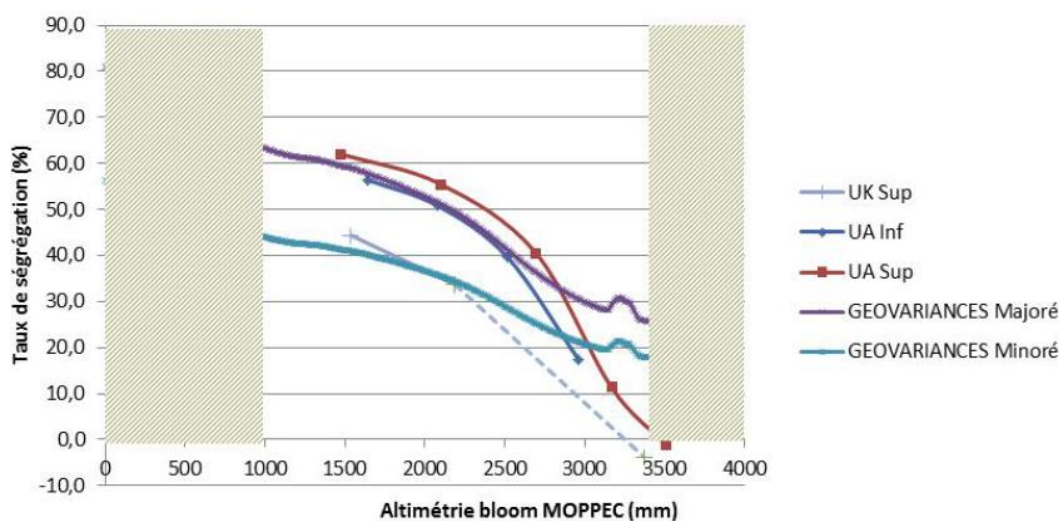


Figure 23 : Évolution de la teneur en carbone maximale – comparaison des calottes avec les données MOPPEC post-traitées, majorées et minorées

Areva NP constate :

- une similitude, en partie haute de bloom, dans l'évolution de la ségrégation majeure positive, en teneur et en positionnement, entre les calottes sacrificielles et le bloom MOPPEC ;
- que les taux de ségrégation des calottes sacrificielles encadrent les taux du bloom MOPPEC.

Areva NP considère que cette analyse complémentaire permet de conforter l'appréciation de la faible variabilité des ségrégations observées entre les différentes calottes sacrificielles.

4.2.5. Position du rapporteur sur la justification de la représentativité

Le rapporteur considère acceptable le choix des facteurs prépondérants (teneur en carbone et effet de trempe), ainsi que l'analyse des paramètres les influençant :

- la comparaison des paramètres de coulée et de solidification des lingots ;
- la comparaison des paramètres et données de forgeage et d'emboutissage ;
- l'analyse du positionnement relatif des différentes calottes dans leur bloom de référence ;
- la comparaison des paramètres de trempe et des vitesses de refroidissement.

Toutefois, le rapporteur constate que les données objectives de fabrication relatives à l'opération de trempe (température et durée d'austénitisation, temps de transfert entre le four et la bache de trempe, conditions de réalisation et épaisseurs au stade embouti avant traitement thermique) sont utilisées comme données d'entrée d'un calcul thermique pour estimer les vitesses de refroidissement. Ainsi, l'effet de trempe est estimé par un calcul et n'est pas directement mesurable.

Le rapporteur considère que les données expérimentales issues d'essais physiques réalisés au moment de la fabrication ou dans le cadre du programme d'essais présentent davantage d'intérêt, dans la mesure où ces données conditionnent la variabilité entre pièces s'agissant de la ségrégation majeure positive. Le rapporteur considère acceptable :

- la comparaison des teneurs en carbone mesurées à la coulée et sur éprouvettes en zone de recette ;
- la comparaison des teneurs en carbone mesurées en peau externe ;
- la comparaison des propriétés mécaniques en zone de recette.

Le rapporteur considère que la justification de la représentativité des calottes sacrificielles, par rapport aux calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville, s'appuie sur une quantité importante de paramètres et de données. Cette quantité de paramètres et de données dépasse ce qui est habituellement analysé dans le cadre des qualifications techniques des opérations d'élaboration de matériaux réalisées aujourd'hui en application de l'arrêté ESPN en référence [3]. Le rapporteur considère cependant que ce surcroît est nécessaire du fait, d'une part qu'il s'agit du traitement d'une non-conformité, d'autre part que les paramètres disponibles sur les pièces de Flamanville sont limités.

Une qualification technique s'appuierait en effet sur quelques paramètres essentiels et influents, tels que le poids de lingot et les taux de chute, et sur les résultats de caractérisation et d'essais mécaniques visant à intercepter les risques de perte d'homogénéité en termes de santé interne et de propriétés mécaniques (filiations de teneur en carbone, essais de traction et de résilience au quart et à moitié de l'épaisseur).

La justification de la représentativité proposée par Areva NP repose sur la comparaison de nombreux autres paramètres de fabrication (par exemple les épaisseurs usinées et les vitesses de refroidissement à la trempe) et le programme d'essais réalisé par Areva NP donne accès à une quantité de données expérimentales beaucoup plus importante (notamment les valeurs de ténacité et les différentes températures d'indexation).

Le rapporteur considère que les conclusions des analyses complémentaires réalisées par Areva NP apportent un éclairage sur certains aspects de la justification. C'est en particulier le cas de l'exploitation géostatistique des mesures de teneur en carbone en surface externe dont les conclusions sur la variabilité des résultats entre les cinq calottes, de l'ordre de 0,02 %, permettent de considérer que les teneurs en carbone sont comparables. Le rapporteur constate ainsi, globalement, que les conclusions des analyses complémentaires menées par Areva NP confirment la représentativité des calottes sacrificielles par rapport aux calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville. Le rapporteur considère toutefois que ces analyses complémentaires, du fait de leur nouveauté, doivent être considérées avec précaution.

Finalement, même si le rapporteur considère que les garanties apportées sur la représentativité sont satisfaisantes, le travail réalisé par Areva NP met néanmoins en évidence certaines différences entre les calottes étudiées, difficiles à juger au plan quantitatif. Le rapporteur identifie en particulier certains éléments défavorables :

- les différentes calottes ont été fabriquées à des périodes différentes (voir Tableau 26) et pour des clients différents ;
- les fabrications de ces calottes n'ont pas fait l'objet d'une surveillance mandatée par l'ASN et, pour les calottes sacrificielles, la surveillance exercée par le client n'a pas été réalisée en application des dispositions applicables pour les installations nucléaires de base françaises. Par ailleurs, le rapporteur n'a pas eu accès aux conclusions de cette surveillance ;
- les teneurs en carbone dans l'épaisseur et les propriétés mécaniques en zone de ségrégation majeure positive des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville ne sont pas disponibles. Les comparaisons des différentes calottes ne peuvent donc

- pas être menées sur les grandeurs d'intérêt direct et se concentrent sur des paramètres relais ;
- malgré des paramètres de fabrication très proches, les caractéristiques mécaniques présentent une variabilité naturelle induisant une certaine incertitude à prendre en considération lorsque l'on réalise des comparaisons.

Calotte	UK sup	UA inf	UA sup	FA3 sup	FA3 inf
Année de fabrication	2013	2010/2011	2009	2006	2007

Tableau 26 : Années de fabrication des calottes

Le rapporteur considère en conséquence que l'appréciation des propriétés du matériau des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville, à travers les essais réalisés sur des éprouvettes prélevées sur les calottes représentatives sélectionnées par Areva NP doit se faire selon une démarche dont le conservatisme présente des garanties éprouvées par la pratique. Ces propriétés peuvent ensuite être utilisées comme données d'entrée des analyses de rupture brutale, dont la méthode est codifiée, et qui présente ses propres conservatismes.

4.3. Résultats et interprétation du programme d'essais

Les résultats obtenus dans le cadre du programme d'essais et l'interprétation qui en est faite par Areva NP, détaillés ci-après, sont :

- les propriétés en traction ;
- la résilience ;
- les températures T_{NDT} et RT_{NDT} ;
- la ténacité dans les domaines de comportement fragile et de la transition fragile-ductile ;
- la ténacité dans le domaine de comportement ductile ;
- les mécanismes de rupture.

4.3.1. Paramètres influençant les propriétés mécaniques

Selon Areva NP, la variation des propriétés mécaniques au sein d'une calotte est imputable à l'hétérogénéité chimique, via la variation de la teneur en carbone et à la variation de la vitesse de refroidissement lors de la trempe dans l'épaisseur de cette calotte [35].

La zone de ségrégation majeure positive est enrichie en carbone ainsi qu'en éléments d'alliage (manganèse, molybdène, silicium) qui ségrégent dans des proportions plus ou moins comparables à celles du carbone. Cette zone est également enrichie en impuretés (soufre, phosphore). Néanmoins, la concentration en impuretés à la coulée étant très faible pour les calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville, celle-ci reste également très faible dans les zones ségréguées. Une légère augmentation des impuretés en zone ségréguée ne peut contribuer à modifier sensiblement le comportement mécanique avant vieillissement en service de la zone ségréguée comparativement à celui de la zone de recette. Par conséquent, Areva NP considère que le carbone constitue l'élément d'alliage qui influence le plus le durcissement et la trempabilité.

Areva NP a donc interprété les propriétés mécaniques mesurées au quart de l'épaisseur ($1/4T$), à la mi-épaisseur ($1/2T$) et aux trois quarts de l'épaisseur ($3/4T$) depuis la face externe des calottes sacrificielles au regard de la vitesse de trempe et de la teneur en carbone.

Vitesse de refroidissement lors de la trempe dans les calottes

Comme indiqué précédemment, la vitesse de trempe dans l'épaisseur de chaque calotte du programme sacrificiel a été déterminée par Areva NP à partir de calculs thermiques. L'estimation de l'évolution de la vitesse de refroidissement dans l'épaisseur des calottes à la suite de la trempe déterminée par Areva NP est présentée sur la Figure 16 en page 60. La vitesse de trempe est maximale au niveau des peaux et décroît rapidement des peaux jusqu'au quart de l'épaisseur derrière ces peaux. La variation de la vitesse de trempe entre le quart et les trois quarts de l'épaisseur est nettement moins marquée.

Teneur en carbone dans l'épaisseur des calottes sacrificielles et étendue de la zone ségréguée

Les teneurs en carbone des éprouvettes d'essai prélevées dans les zones macroségréguées des calottes sacrificielles ont été mesurées par analyse chimique. Le Tableau 27 résume, pour chaque zone de prélèvement (tranches de 400 mm x 400 mm) de chaque calotte sacrificielle, les vitesses de trempe calculées ainsi que les teneurs en carbone en valeur minimale, maximale et moyenne mesurées sur l'ensemble des éprouvettes de résilience et ténacité (Tableau 27).

Areva NP considère la teneur en carbone moyenne comme un bon indicateur pour caractériser le comportement de chaque zone de prélèvement. Pour les zones où la variation de carbone était supérieure à $\pm 0,01$ %, l'interprétation des résultats repose sur l'exploitation d'une population de données réduite aux données obtenues sur des éprouvettes avec des teneurs en carbone les plus élevées et les plus homogènes entre éprouvettes.

	UK Sup		UA Inf			UA Sup		
	¼ T	½ T	¼ T	½ T	¾ T	¼ T	½ T	¾ T
Vitesse trempe (°C/h)	1318	1010	1386	1302	1414	1354	1058	1388
Teneur en carbone moyenne (*) (%)	0,254	0,221	0,266	0,254	0,221	0,279	0,268	0,227
Teneur en carbone min. (*) (%)	0,243	0,196	0,251	0,224	0,200	0,258	0,251	0,206
Teneur en carbone max. (*) (%)	0,268	0,241	0,276	0,267	0,246	0,296	0,282	0,247
Écart-type (%)	0,005	0,011	0,005	0,009	0,013	0,009	0,007	0,011

(*) Sur la base des analyses chimiques réalisées sur les éprouvettes de ténacité CT12,5 et des éprouvettes de résilience.

Tableau 27 : Teneurs en carbone et vitesses de trempe aux différentes profondeurs des calottes UK Sup, UA Inf et UA Sup où ont été prélevées les éprouvettes

Les analyses chimiques réalisées montrent que la teneur en carbone décroît de la peau externe à la peau interne (Tableau 27, Figure 24). La zone ségréguée avec une teneur en carbone maximale supérieure ou égale à 0,25 % s'étend de la peau externe jusqu'à la mi-épaisseur pour la calotte supérieure UK et atteint les trois quarts de l'épaisseur des calottes supérieure et inférieure UA, comme le montre la Figure 24. Pour mémoire, la teneur maximale en carbone est de 0,32 %, mesurée en peau externe de la calotte supérieure UA [36]. Cette décroissance est cohérente avec les mesures réalisées en face interne des calottes sacrificielles qui montrent que la ségrégation n'atteint pas la peau interne.

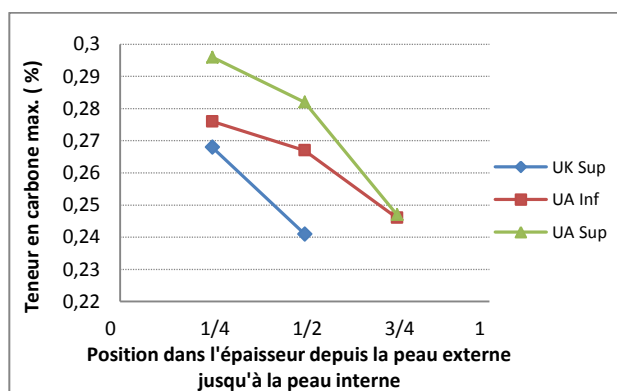


Figure 24 : Teneur en carbone maximale mesurée sur les éprouvettes testées dans l'épaisseur de chaque calotte sacrificielle

4.3.2. Propriétés en traction

Les essais de traction ont été réalisés et dépouillés selon deux normes :

- la norme ISO 6892-1 d'octobre 2009 pour les essais à température ambiante ;
- la norme ISO 6892-2 d'avril 2011 pour les essais à chaud.

4.3.2.1. En zone de recette

En zone de recette des cinq calottes ayant fait l'objet d'une caractérisation, la limite d'élasticité ($R_{p0,2}$) et la limite à rupture (R_m) en fonction de la température évoluent de manière similaire et restent cohérentes avec les données caractéristiques d'un acier 16MND5 issues de la littérature (essais FISTER [42]) comme le montre la Figure 25 [13]. La calotte supérieure UA présente des caractéristiques en traction légèrement plus élevées à basse température.

La limite d'élasticité en zone de recette des cinq calottes testées varie peu. À titre d'exemple, elle est comprise entre 435 et 462 MPa à température ambiante et entre 380 et 430 MPa à 330 °C.

La limite à rupture est comprise entre 568 et 584 MPa à température ambiante et décroît à plus haute température.

Pour l'ensemble des calottes, l'allongement à rupture en zone de recette est supérieur ou égal à 22 % sur la plage de température de -150 °C à 330 °C.

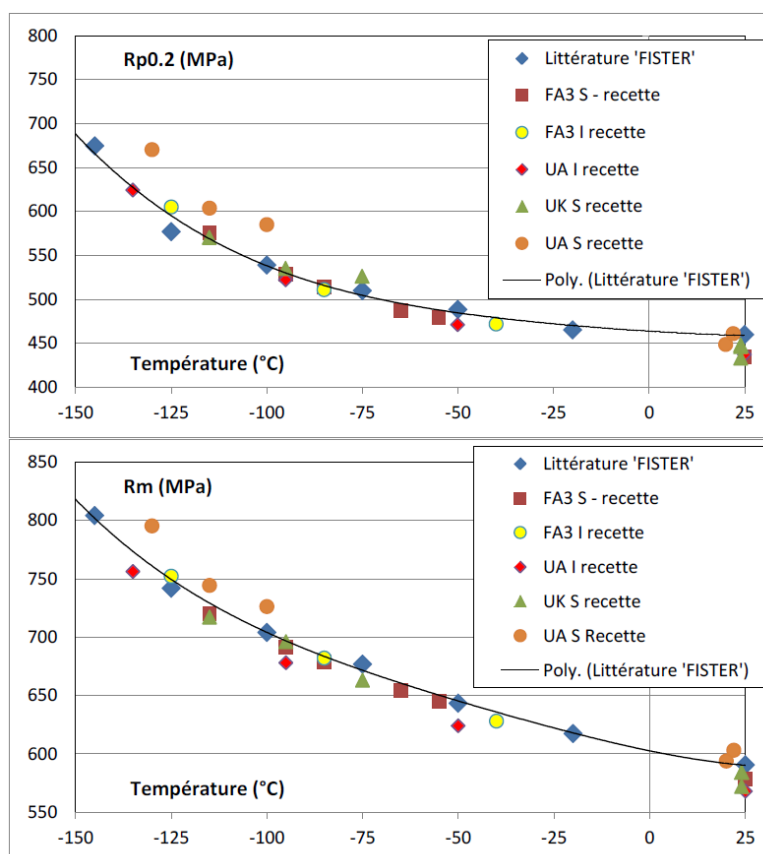


Figure 25 : Évolution en fonction de la température de la limite d'élasticité $R_{p0,2}$ (graphique du haut) et de la limite à rupture R_m (graphique du bas)

4.3.2.2. En zone ségréguée

Areva NP indique que les courbes d'évolution des limites d'élasticité ($R_{p0,2}$) et à rupture (R_m) en fonction de la température se déduisent de celles obtenues en zone de recette par un décalage en contrainte.

La limite d'élasticité en zone ségréguée est systématiquement supérieure ou égale à celle mesurée en zone de recette. Comme le montre la Figure 26, l'écart entre la limite d'élasticité en zone ségréguée et celle en zone de recette ($\Delta R_{p0,2}$) décroît du quart aux trois quarts de l'épaisseur des calottes, ce qui est corrélé à une diminution de la teneur en carbone dans l'épaisseur des calottes (Tableau 28). Les mêmes constats s'appliquent pour le décalage de la limite à rupture (ΔR_m) (Tableau 28 et Figure 26).

Areva NP constate que l'allongement à la rupture minimal obtenu sur trois essais reste supérieur ou égal à 20 % à température ambiante quelle que soit la teneur en carbone de la zone de prélèvement (quart de l'épaisseur, mi-épaisseur ou trois quarts de l'épaisseur) (Tableau 28).

Ces résultats permettent de respecter les spécifications du code RCC-M en ce qui concerne les propriétés en traction.

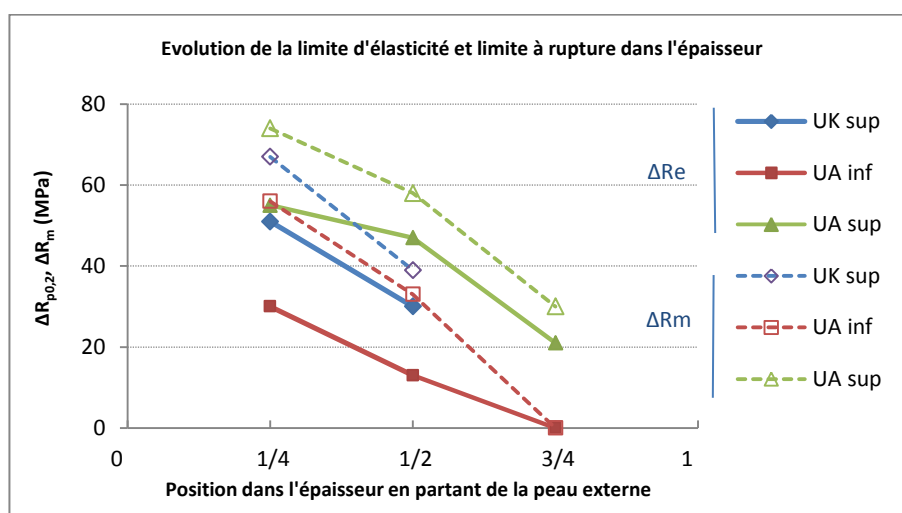


Figure 26 : Décalage des limites d'élasticité et à rupture à 330 °C de la zone ségréguée par rapport à la zone de recette, en fonction de la position dans l'épaisseur

Zone	UK Sup		UA Inf			UA Sup		
	1/4 T	1/2 T	1/4 T	1/2 T	3/4 T	1/4 T	1/2 T	3/4 T
Vitesse trempe (°C/h) [12]	1318	1010	1386	1302	1414	1354	1058	1388
%C moy (*)	0,254	0,221	0,263	0,245	0,205	0,271	0,262	0,219
Écart-type %C	0,005	0,006	0,005	0,012	0,008	0,007	0,005	0,003
$\Delta R_{p0,2}$ (MPa)	51	30	30	13	0	55	47	21
ΔR_m (Mpa)	67	39	56	33	0	74	58	30
A % min. ambiante	20	24	21	20	24	21	20	24

(*) valeur tirée des mesures sur éprouvette de traction

Tableau 28 : Décalage des limites d'élasticité et à rupture à 330 °C et allongement minimal [13]

4.3.3. Propriétés de résilience

Les essais de résilience, dits essais Charpy, ont été réalisés conformément à la norme ISO 148-1 de janvier 2011 [34].

Pour Areva NP, l'allure des courbes de résilience en zone ségrégée des calottes supérieure UK, inférieure UA et supérieure UA sont comparables. Elles sont décalées vers les températures plus élevées comparativement aux courbes obtenues en zone de recette (Figure 27). La température T_{68J} évolue en fonction de la position dans l'épaisseur des calottes (Figure 28) et par conséquent en fonction de la teneur en carbone (Tableau 29). L'écart maximal entre la température T_{68J} mesurée en zone ségrégée et celle mesurée en zone de recette (ΔT_{68J}) est de l'ordre de 60 °C, valeur déterminée pour la calotte UA Sup présentant la teneur en carbone la plus élevée (Tableau 29 et Figure 29).

Areva NP note que le palier ductile est abaissé par rapport à la zone de recette comme le montre la Figure 27. La résilience à chaud (palier ductile) en zone ségrégée, toutes calottes confondues, est comprise entre 170 J et 200 J (Tableau 29).

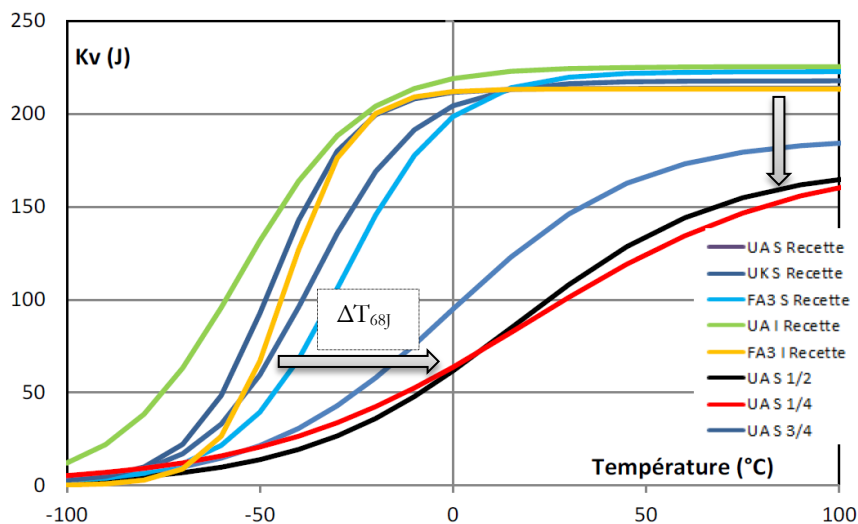


Figure 27 : Comparaison des courbes de transition en zone ségrégée comparativement à la zone de recette pour la calotte UA Sup présentant la teneur en carbone la plus élevée

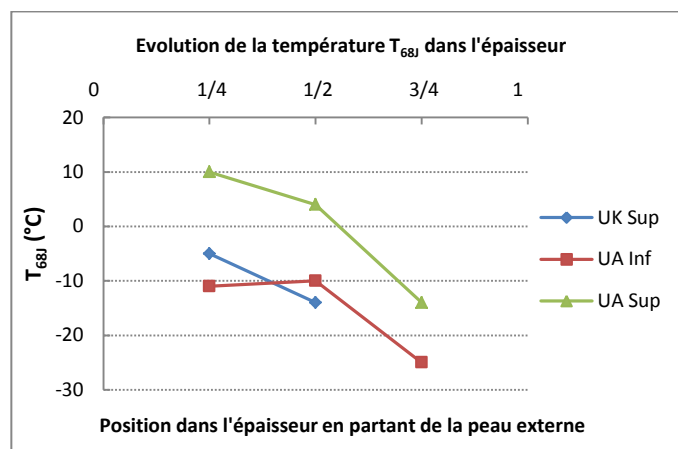


Figure 28 : Évolutions de T_{68J} en fonction de la position dans l'épaisseur des calottes sacrificielles

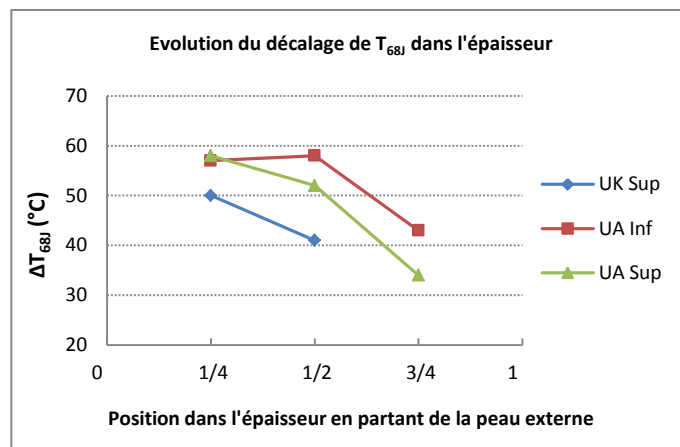


Figure 29 : Évolutions du décalage de T_{68J} en fonction de la position dans l'épaisseur des calottes sacrificielles

Zone	UK Sup		UA Inf			UA Sup		
	1/4 T	1/2 T	1/4 T	1/2 T	3/4 T	1/4 T	1/2 T	3/4 T
Vitesse trempé (°C/h) [12]	1318	1010	1386	1302	1414	1354	1058	1388
C moy (%)*	0,252	0,225	0,265	0,258	0,227	0,281	0,27	0,23
Écart-type %C (%)	0,005	0,01	0,006	0,006	0,006	0,008	0,004	0,01
T _{CV} (°C)	20	5	5	5	-20	30	30	0
T _{68J} (°C)	-5	-14	-11	-10	-25	10	4	-14
ΔT _{68J} (°C)	50	41	57	58	43	58	52	34
Palier ductile (J)	185	196	187	181	185	176	172	186

(*) valeur tirée des mesures sur éprouvette de résilience

Tableau 29 : Synthèse des résultats issus des essais de résilience en zone ségréguée (T_{CV} , T_{68J} , ΔT_{68J} et niveau de résilience au palier ductile) [13]

Areva NP remarque que la teneur en carbone varie peu au sein des éprouvettes de résilience prélevées au quart de l'épaisseur des calottes UK et UA. La variation est inférieure à $\pm 0,01\%$ (Tableau 29). Pour la construction de la courbe de résilience à mi-épaisseur et aux trois quarts de l'épaisseur de la calotte inférieure UA, la variation de la teneur en carbone entre les éprouvettes testées étant supérieure à $\pm 0,01\%$, Areva NP a retenu une population de données réduite à celle issue des essais sur les éprouvettes avec les teneurs en carbone les plus élevées de façon à réduire la variation de la teneur en carbone. Ceci permet à Areva NP de considérer que les températures de transition définies à partir des courbes de résilience sont représentatives du comportement du matériau ayant une teneur en carbone correspondant à la valeur moyenne dans la zone ségréguée à la profondeur considérée [13].

Lors d'une précédente campagne d'essais qui s'est déroulée sur une période allant de 2014 à début 2016 [8], une carotte prélevée dans la partie centrale de la calotte supérieure UA a également fait l'objet d'une caractérisation. Cette caractérisation a montré que la résilience évolue peu de la peau jusqu'aux trois quarts de l'épaisseur puis augmente significativement à partir des trois quarts de l'épaisseur. Cette variation importante de la résilience selon la profondeur est attribuée aux effets antagonistes de la vitesse de trempe et de la teneur en carbone (Figure 30). Pour Areva NP, l'effet de la teneur en carbone, qui a tendance à affaiblir la résilience, est mitigé par l'effet de trempe, de plus en plus bénéfique à mesure que l'on s'approche de la peau, qui a tendance à l'augmenter.

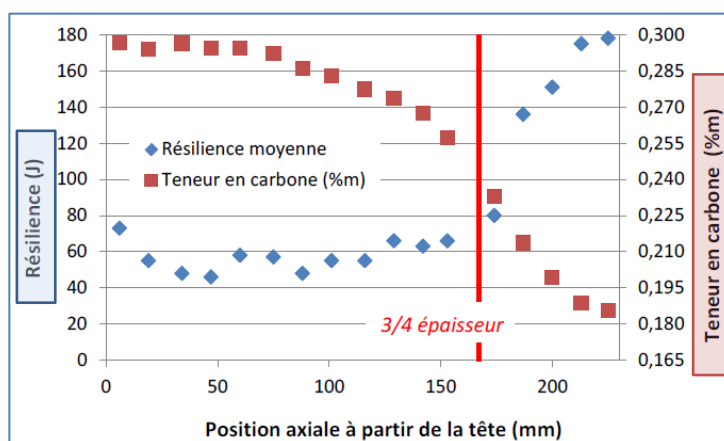


Figure 30 : Évolution de la résilience et de la teneur en carbone le long de l'axe de la carotte prélevée dans la calotte UA Sup – Essais de flexion par choc réalisés à 0 °C [8]

4.3.4. Températures T_{NDT} et RT_{NDT}

La température de transition à ductilité nulle, T_{NDT} , a été déterminée à partir d'essais Pellini réalisés selon la norme ASTM E208 de 1975, conformément au code RCC-M, afin de conserver le référentiel utilisé pour toutes les cuves des réacteurs français en fonctionnement [34].

La T_{NDT} est la température au-dessus de laquelle ne peut pas se déclencher une rupture fragile à partir d'un défaut de petite dimension sous une contrainte voisine de la limite d'élasticité du matériau. L'essai Pellini est un essai de flexion par choc d'une éprouvette rectangulaire avec un cordon de soudure pré-entailé à la scie. En général, huit éprouvettes au maximum (pour quatre températures d'essai) sont nécessaires pour déterminer la T_{NDT} . Les essais sont réalisés par un encadrement progressif de la température à laquelle au moins une éprouvette testée, sur les deux testées à la même température, est rompue. La T_{NDT} correspond alors à cette température.

La température de transition RT_{NDT} s'obtient en combinant les résultats des essais Pellini aux résultats d'essais de résilience réalisés sur éprouvettes de flexion par choc avec entaille en V, conformément à la norme ISO 148-1 de janvier 2011 [34]. Les essais sont réalisés à une température initiale égale à $T_{NDT} + 33$ °C. La RT_{NDT} est égale à la température d'essai, diminuée de 33°C³⁰, qui permet de respecter, pour chacune des trois éprouvettes testées à cette température, les deux critères énoncés ci-après:

- la résilience est supérieure ou égale à 68 J ;
- l'expansion latérale est supérieure ou égale à 0,9 mm.

³⁰ Si les deux critères ne sont pas respectés à une température donnée, de nouveaux essais de résilience sont réalisés en ajoutant 5 °C jusqu'à ce qu'ils le soient.

Ces deux critères ont été respectés pour tous les essais menés sur les éprouvettes prélevées dans les calottes sacrificielles, quelle que soit la zone considérée, zone de recette ou zone ségréguée. Ainsi, pour toutes les caractérisations réalisées sur les calottes sacrificielles du programme d'essais d'Areva NP, la température de transition RT_{NDT} est égale³¹ à la T_{NDT} .

4.3.4.1. En zone de recette

La RT_{NDT} en zone de recette est comprise entre -20 °C et -45 °C pour l'ensemble des calottes expertisées (Tableau 30). En zone de recette, la teneur en carbone est de l'ordre de 0,18 %.

Calotte	FA3 Sup	FA3 Inf	UK Sup	UA Inf	UA Sup
$T_{NDT} = RT_{NDT}$ (°C)	-30	-20	-45	-30	-35

Tableau 30 : Température de transition en zone de recette

4.3.4.2. En zone ségréguée

Selon Areva NP, bien que la teneur en carbone varie notablement en zone ségréguée de chaque calotte sacrificielle, les valeurs de RT_{NDT} mesurées au sein de chacune de ces calottes à différentes profondeurs en zone ségréguée présentent une très faible dispersion (Tableau 31, Tableau 32, Tableau 33) [13]. La variation de la RT_{NDT} au sein d'une même calotte est de 5 °C entre le quart de l'épaisseur et la mi-épaisseur (Figure 31).

Tranche	Position dans l'épaisseur	%C moy(*)	%C min(*)	% C max(*)	RT_{NDT} (°C)
2	1/7 T	0,257	0,251	0,266	0
4	1/3 T	0,250	0,244	0,254	-5
5	3/7 T	0,239	0,231	0,244	-5
7	5/8 T	0,199	0,190	0,206	-15

(*) mesurée sur éprouvette Pellini

Tableau 31 : Calotte supérieure UK – Évolution de la RT_{NDT} en fonction de la teneur en carbone

Tranche	Position dans l'épaisseur	%C moy (*)	%C min (*)	% C max (*)	RT_{NDT} (°C)
2	1/4 T	0,257	0,251	0,262	-5
3	1/2 T	0,237	0,226	0,259	0
4	3/4 T	0,217	0,199	0,238	-10

(*) mesurée sur éprouvette Pellini

Tableau 32 : Calotte inférieure UA – Évolution de la RT_{NDT} en fonction de la teneur en carbone

³¹ C'est ce qui est en règle générale constaté pour ce type d'acier en zone de recette.

Tranche	Position dans l'épaisseur	%C moy (*)	%C min (*)	%C max (*)	T _{NDT} (°C)
2	1/7 T	0,283	0,277	0,290	5
4	1/3 T	0,278	0,269	0,287	5
5	3/7 T	0,270	0,257	0,288	5
7	5/8 T	0,247	0,236	0,261	0
9	5/6 T	0,198	0,194	0,203	-20

(*) mesurée sur éprouvette Pellini

Tableau 33 : Calotte supérieure UA – Évolution de la RT_{NDT} en fonction de la teneur en carbone

Toutes calottes confondues, les RT_{NDT} en zone ségréguée sont comprises entre -10 °C et 5 °C. La dispersion est donc sensiblement plus faible que la dispersion de la RT_{NDT} en zone de recette de l'ensemble des calottes (Tableau 30).

Areva NP souligne qu'à 30 mm de la mi-épaisseur vers la peau intérieure de la calotte supérieure UK, la RT_{NDT} est de -15 °C (Figure 31). Pour la calotte supérieure UA, pour laquelle la ségrégation atteint les trois quarts de l'épaisseur, les mesures faites entre les trois quarts de l'épaisseur et la peau interne conduisent à une RT_{NDT} de -20 °C, égale à la valeur maximale spécifiée par le code RCC-M (Figure 31).

Enfin, Areva NP note que l'écart entre la RT_{NDT} en zone ségréguée (comprise entre le quart et les trois quarts de l'épaisseur) et celle en zone de recette est compris entre 20 °C et 45 °C (Figure 32). Areva NP conclut de ces mesures que l'augmentation de la teneur en carbone conduit à une augmentation significative de la RT_{NDT}.

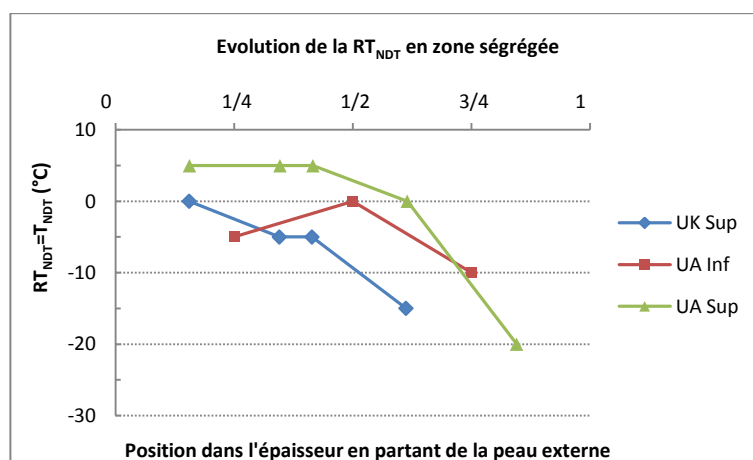


Figure 31 : Évolution de la RT_{NDT} en zone ségréguée dans l'épaisseur des calottes sacrificielles

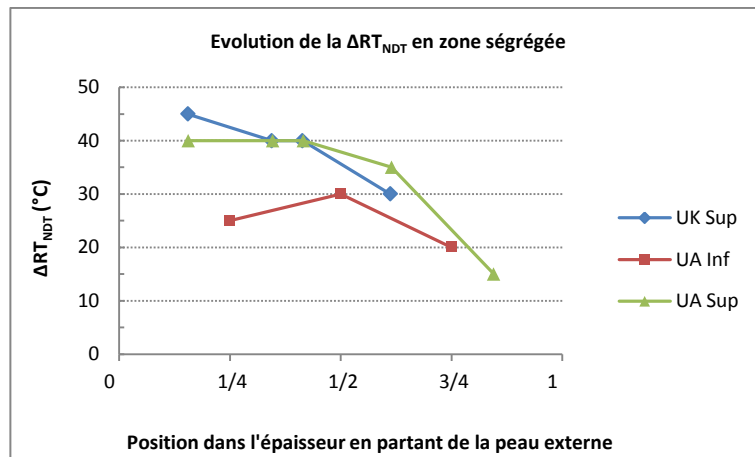


Figure 32 : Évolution du décalage de RT_{NDT} en zone ségrégée dans l'épaisseur des calottes sacrificielles

Areva NP remarque que la teneur en carbone varie peu au sein des tranches des calottes supérieures UK et UA où ont été prélevées les éprouvettes Pellini. Celle-ci varie de plus ou moins 0,01 % (Tableau 31, Tableau 32, Tableau 33). Areva NP estime donc que la T_{NDT} mesurée dans chaque tranche est représentative d'un matériau de teneur en carbone correspondant à la moyenne de la zone où les éprouvettes Pellini ont été prélevées, présentée dans les Tableau 31, Tableau 32 et Tableau 33.

Pour la calotte inférieure UA, Areva NP note aussi que la teneur en carbone est peu dispersée dans la tranche 2, correspondant au quart de l'épaisseur, mais que la variation de la teneur en carbone à la mi-épaisseur est plus importante.

Au final, Areva NP retient que la T_{NDT} mesurée en zone ségrégée est supérieure à la valeur maximale prévue lors de la conception, dite T_{NDT} de conception, de -20 °C.

Pour Areva NP, l'augmentation de la T_{NDT} en zone ségrégée apparaît cohérente avec les tendances observées à partir des résultats des essais de traction et de résilience. Toutefois, Areva NP n'attribue pas uniquement l'augmentation de la T_{NDT} à une perte de capacité du matériau à résister à l'amorçage de défaut et à la propagation d'une fissure initiée sur ce défaut. Areva NP attribue en effet l'augmentation de la T_{NDT} en partie au durcissement induit par la teneur en carbone plus élevée en zone ségrégée qu'en zone de recette. D'après les estimations d'Areva NP, ce durcissement, qui se traduit par une élévation de la limite d'élasticité, conduit à une augmentation de la sollicitation de 10 % et de l'énergie à dissiper par la fissuration lors de l'essai Pellini, ce dernier étant un essai à déformation imposée [13]. Les conditions de sollicitation du défaut étant plus sévères en zone ségrégée qu'en zone de recette, il apparaît logique selon Areva NP que le phénomène de durcissement contribue à ce que la T_{NDT} en zone ségrégée soit plus élevée qu'en zone de recette.

4.3.5. Ténacité dans le domaine de la transition fragile-ductile

Les essais de ténacité ont été réalisés et dépouillés selon la norme ASTM E1921 de 2013. Cette norme présente le protocole de l'approche « Master Curve ». Cette approche, qui tire profit des connaissances acquises sur les mécanismes de rupture par clivage des aciers ferritiques, permet de déterminer la distribution statistique de la ténacité d'un acier ferritique en fonction de la température.

La Master Curve (MC) est une courbe empirique, associée à une probabilité de rupture de 50 %, qui décrit l'évolution en fonction de la température de la ténacité des aciers ferritiques dans leur domaine de comportement fragile-ductile. Cette courbe est indexée sur la température dite de référence T_0 , qui est la température pour laquelle la ténacité vaut $100 \text{ MPa.m}^{0.5}$, en théorie. Cette température de référence T_0 est déterminée par des essais de ténacité. Au sein d'une zone pouvant être considérée comme homogène en termes de microstructure et de composition chimique, une dizaine d'essais de ténacité est suffisante pour déterminer T_0 avec une bonne précision.

De manière analogue à la RT_{NDT} , plus la température de référence T_0 d'un acier ferritique est basse, plus sa ténacité est élevée. De même, une augmentation de cette dernière traduit une diminution de la ténacité. La variation de la température T_0 constitue donc un paramètre d'appréciation de la ténacité des zones ségréguées au regard de celle en zone de recette.

Des bornes de tolérance de la Master Curve sont également définies à différentes probabilités de rupture (par exemple 5 % et 95 %) (ceci est illustré à partir de données de la littérature scientifique sur la Figure 33). Dans le cadre du programme d'essais sur les calottes de cuve, le positionnement des données de ténacité par rapport à ces bornes permet d'apprécier la dispersion statistique des résultats d'essais de ténacité, au regard de ce qui est attendu pour un acier ferritique. Le nombre d'essais réalisés pour caractériser la ténacité à différentes profondeurs des zones ségréguées des calottes sacrificielles a été notablement augmenté par rapport aux exigences de la norme ASTM E1921 afin de couvrir le domaine de température où le comportement est mixte fragile-ductile.

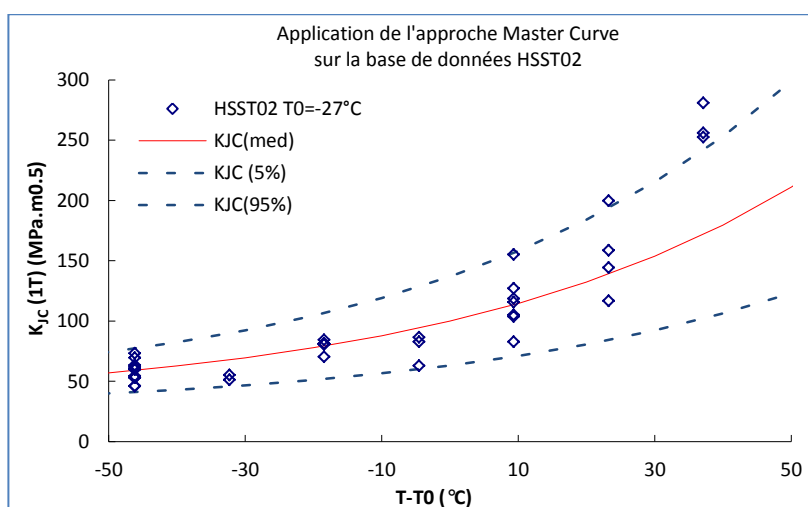


Figure 33 : Exemple d'application donnée par le rapporteur de l'approche Master Curve
Bornes de tolérance à 50 %, 5 % et 95 %

Les données de ténacité ont également été positionnées par rapport à la courbe de ténacité ZG6110 prescrite par le code RCC-M (Figure 4), qui est la courbe de référence utilisée en conception et en exploitation pour les réacteurs nucléaires français. Cette courbe empirique donne l'évolution de la ténacité en fonction de la température ($T-RT_{NDT}$). Elle a été établie dans le courant des années 1970 puis révisée en 2000, pour constituer une borne inférieure d'un millier de données de ténacité relatives à des aciers ferritiques de nuance équivalente ou très proche de la nuance d'acier des calottes de cuve du réacteur EPR.

L'interprétation faite par d'Areva NP des résultats d'essais de ténacité en zone de recette et en zone ségréguée est détaillée ci-après.

4.3.5.1. En zone de recette

Areva NP note qu'en zone de recette des cinq calottes expertisées, les températures de référence T_0 sont très basses (Tableau 34) et comparables à celles issues de la littérature pour des nuances d'acier comparable, à savoir :

- -84 °C pour la cuve américaine de Shoreham [38] ;
- -95 °C pour la base d'EDF établie à partir d'essais réalisés sur une tôle en acier de nuance 18MND5 [39] ;
- -122 °C pour une débouchure de virole en 16MND5, expertisée par le CEA [40] ;
- -90 °C pour la base de données européenne obtenue à partir d'essais réalisés sur un acier de cuve de fabrication allemande [41].

Areva NP a déterminé la température T_{env} d'indexation optimale de la courbe du RCC-M (voir Figure 18), qui englobe de façon optimale les résultats de ténacité. Areva NP constate que cette température apparaît plus proche de la température T_0 que de la RT_{NDT} qui est beaucoup plus élevée (Tableau 34).

Calotte	FA3 sup	FA3 inf	UK sup	UA inf	UA sup
T_0	-94 °C	-126 °C	-115 °C	-134 °C	-126 °C
T_{env}	-75 °C	-109 °C	-96 °C	-133 °C	-132 °C
RT_{NDT}	-30 °C	-20 °C	-45 °C	-30 °C	-35 °C

Tableau 34 : Température de référence et température d'indexation optimale de la courbe RCC-M en zone de recette

4.3.5.2. En zone ségréguée

En zone ségréguée de l'ensemble des calottes sacrificielles, Areva NP constate que la température de référence T_0 est comprise entre -70 °C et -50 °C entre le quart et la mi-épaisseur (Tableau 35 et Figure 35) et atteint -85 °C aux trois quarts de l'épaisseur des calottes UA. Areva NP note aussi que T_0 varie très peu du quart à la mi-épaisseur d'une même calotte (Tableau 35 et Figure 35).

Areva NP constate, par ailleurs, que l'écart avec la zone de recette (ΔT_0) est comparable à celui observé sur la température ΔT_{68j} (Tableau 35).

Zone	UK Sup		UA Inf			UA Sup		
	¼ T	½ T	¼ T	½ T	¾ T	¼ T	½ T	¾ T
Vitesse trempe (°C/h) [12]	1318	1010	1386	1302	1414	1354	1058	1388
%C moy	0,254	0,221	0,267	0,255	0,221	0,277	0,268	0,225
Écart-type %C	0,005	0,011	0,004	0,007	0,014	0,008	0,008	0,011
T_0 (°C)	-63	-64	-71	-66	-85	-54	-50	-85
ΔT_0 (°C)	52	51	63	68	49	72	76	41
ΔT_{68j} (°C)	50	41	57	58	43	58	52	34

Tableau 35 : Température de référence T_0 et décalage de T_0 dans l'épaisseur des calottes sacrificielles

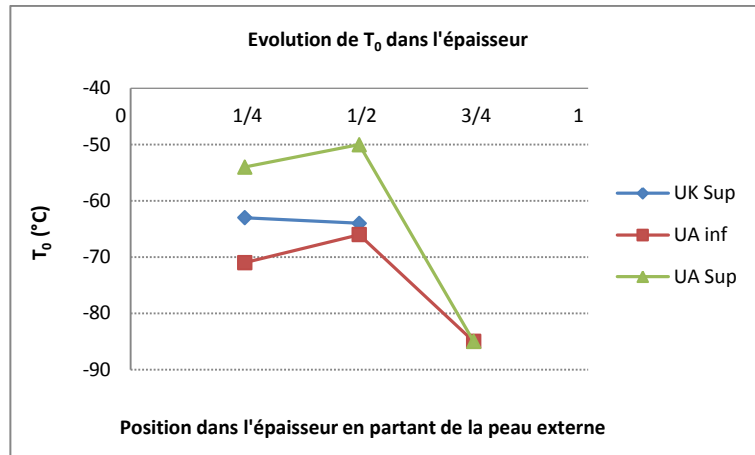


Figure 34 : Évolution de T_0 dans l'épaisseur des calottes UK, UA

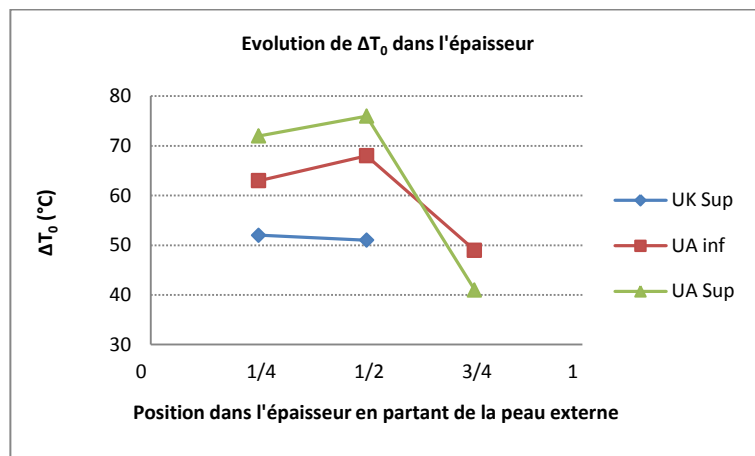


Figure 35 : Évolution du décalage de T_0 entre la zone ségréguée et la zone de recette dans l'épaisseur des calottes UK, UA.

Areva NP a positionné les données de ténacité issues des essais sur éprouvettes prélevées en zone de recette et au quart de l'épaisseur de la zone ségréguée des calottes sacrificielles par rapport aux bornes de tolérances de la Master Curve à 1 % et 99 % (Figure 36) [13]. Areva NP constate que la distribution de ces données de ténacité est comparable à celle attendue pour un acier ferritique décrite par l'approche Master Curve. Il en est de même pour les données de ténacité issues des essais sur éprouvettes prélevées à mi-épaisseur des calottes UK et UA en zone ségréguée. Areva NP en conclut que la zone ségréguée présente un comportement à la rupture classique et que le durcissement lié à la ségrégation du carbone se traduit essentiellement par un décalage de la température de référence T_0 .

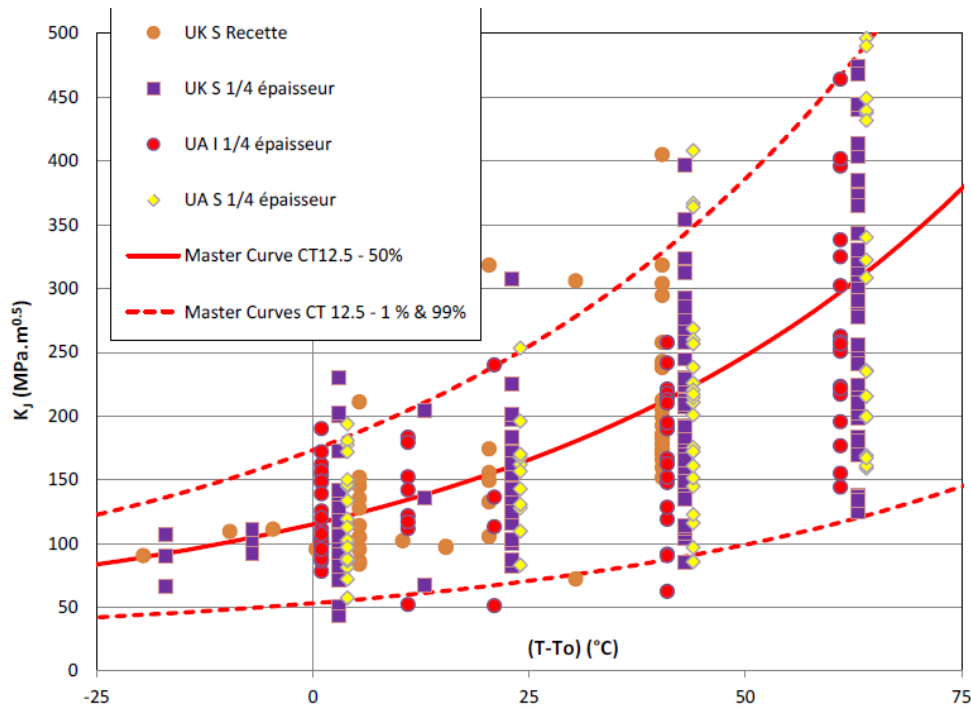


Figure 36 : Positionnement des données de ténacité pour les éprouvettes prélevées au quart de l'épaisseur des calottes sacrificielles [13]

Les données de ténacité ont également été positionnées par Areva NP par rapport à la courbe de ténacité du RCC-M indexée sur différentes températures [13].

Areva NP a vérifié que la courbe du RCC-M indexée sur la température d'indexation, dite *LDS 9*, enveloppe les résultats de ténacité en zone ségréguée (Figure 37 et Figure 38). La température d'indexation *LDS 9* est égale à la RT_{NDT} de fin de vie retenue à la conception (30 °C) par Areva NP, diminuée du décalage lié au vieillissement thermique et sous déformation (15 °C) et de la différence maximale entre la RT_{NDT} de recette des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville et de celle de chacune des trois calottes sacrificielles. En tenant compte de la RT_{NDT} de recette maximale obtenue en zone de recette des calottes de Flamanville, ceci conduit à une température d'indexation *LDS 9*, égale à la RT_{NDT} de recette plus 35 °C. Elle se traduit par un décalage de 35 °C vers la droite de la courbe du RCC-M indexée sur la RT_{NDT} de recette.

Par ailleurs, Areva NP observe sur la Figure 37 et la Figure 38 que l'ensemble des données de ténacité ne sont pas couvertes par la courbe du RCC-M indexée sur la RT_{NDT} de recette. Treize données de ténacité sur les 614 disponibles pour la zone ségréguée apparaissent sous la courbe de ténacité du RCC-M indexée sur la RT_{NDT} de recette (Figure 37).

En plus de la détermination en zone ségréguée de la T'_{NDT} et de la RT_{NDT} , Areva NP a déterminé la température d'indexation permettant d'envelopper de manière optimale la totalité des mesures de ténacité en zone ségréguée. La courbe enveloppe l'ensemble des données de ténacité relatives à la zone ségréguée si la RT_{NDT} de recette est majorée de 20 °C (Figure 37 et Figure 38).

La courbe du RCC-M indexée sur la RT_{NDT} en zone ségréguée, égale à la T'_{NDT} , enveloppe la totalité des données de ténacité, celle-ci étant supérieure ou égale à la RT_{NDT} de recette majorée de 20 °C (ΔRT_{NDT} en zone ségréguée ≥ 20 °C).

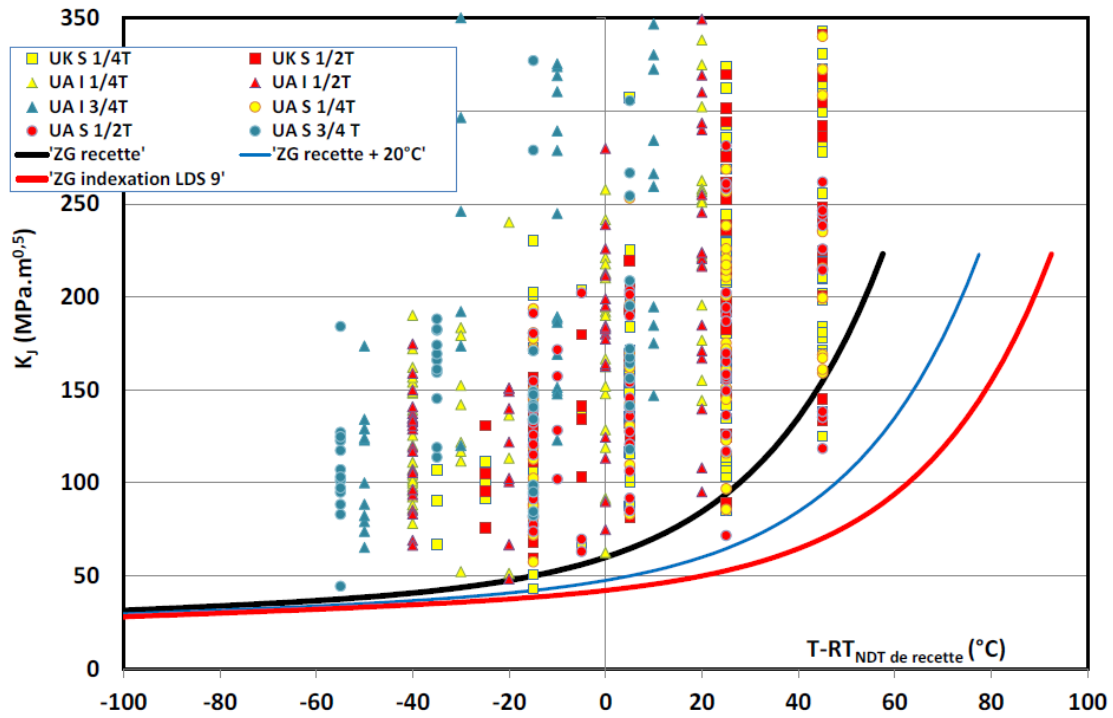


Figure 37 : Positionnement des données de ténacité issues du programme d'essais par rapport à la courbe du RCC-M [13]

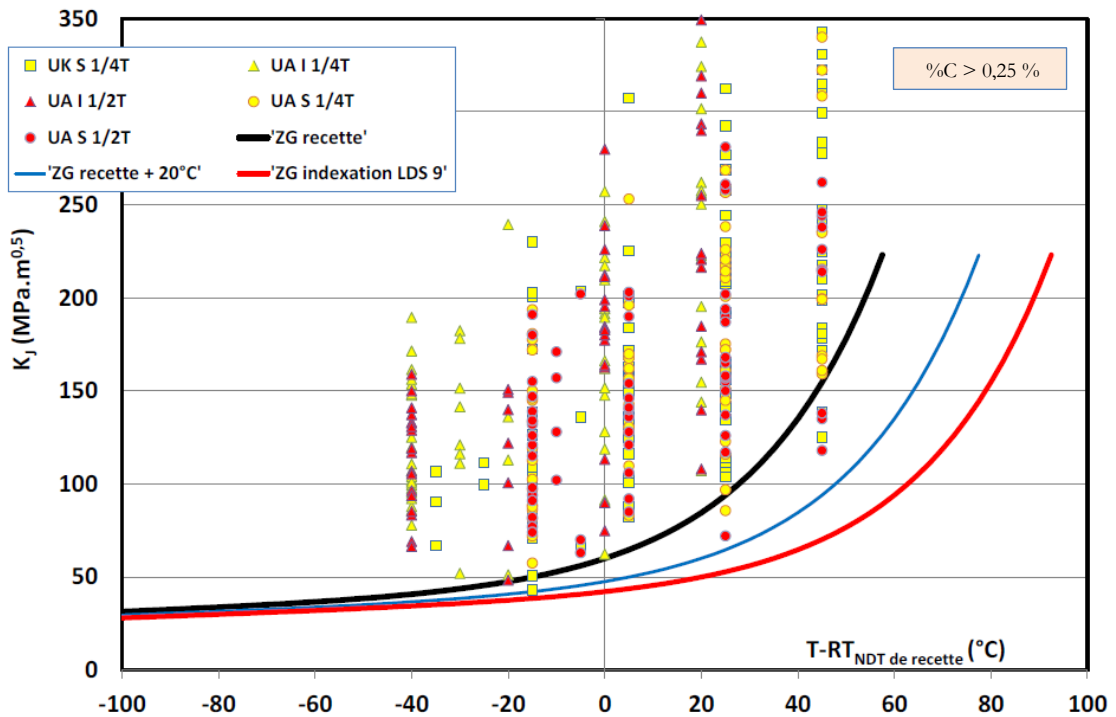


Figure 38 : Positionnement par rapport à la courbe du RCC-M des données de ténacité issues d'essais sur éprouvettes avec des teneurs en carbone supérieures ou égales à 0,25 % [13]

Areva NP a déterminé les températures d'indexation optimale de la courbe du RCC-M pour couvrir les données de ténacité propre à chaque zone de prélèvement au quart, à la mi et aux trois quarts de l'épaisseur, dont la teneur moyenne en carbone est donnée dans le Tableau 35 [13]. Ces températures sont données dans le Tableau 36 pour chaque zone expertisée de chacune des calottes sacrificielles. L'écart maximal entre la température d'indexation optimale et la RT_{NDT} de recette est obtenu au quart de l'épaisseur de la calotte supérieure UK. Il est de 18 °C (Tableau 36), valeur couverte par les 20 °C mentionnés précédemment.

Zone	UK Sup		UA Inf			UA Sup		
	¼ T	½ T	¼ T	½ T	¾ T	¼ T	½ T	¾ T
T_{env} indexation optimale (°C) en zone ségrégée	-27	-39	-32	-31	-63	-30	-21	-62
RT_{NDT} recette (°C)	-45		-30			-35		
$T_{CV} - 33$ (°C)	-13	-28	-28	-28	-53	-3	-3	-33
RT_{NDT} (°C) en zone ségrégée	0	-5	-5	0	-10	5	5	-10 ^(*)

(*) Valeur interpolée (cf. Figure 31)

Tableau 36 : Température d'indexation optimale de la courbe du RCC-M

4.3.6. Ténacité dans le domaine ductile

Les essais de ténacité dans le domaine ductile ont été réalisés et dépouillés selon la norme ASTM E1820 de 2013.

Pour Areva NP, les résultats d'essais montrent que, quelle que soit la zone de prélèvement au sein de la zone ségrégée et, par conséquent, quelle que soit la teneur en carbone, la zone ségrégée présente une résistance à la déchirure ductile ($J_{0,2}$) à 50 °C et 330 °C supérieure aux valeurs minimales spécifiées par le code RCC-M (Tableau 37). Les valeurs minimales à 50 °C et 330 °C sont obtenues à mi-épaisseur de la calotte supérieure UA. Elles sont de 281 kJ/m² à 50 °C et de 269 kJ/m² à 330 °C, contre 265 kJ/m² et 190 kJ/m² pour les valeurs minimales spécifiées par le code RCC-M respectivement à 50 °C et 330 °C. Ceci répond à la demande n° 3 de la lettre de l'ASN en référence [7].

Calotte	UK sup		UA inf			UA sup			Valeur codifiée RCC-M
	¼ T	½ T	¼ T	½ T	¾ T	¼ T	½ T	¾ T	
$J_{0,2mm}$ à 50 °C (kJ/m ²)	495	573	593	615	651	417	281	622	≥265
$J_{0,2mm}$ à 330 °C (kJ/m ²)	325	399	336	447	467	277	269	388	≥190

Tableau 37 : Ténacité dans le domaine ductile mesurée en zone ségrégée des calottes sacrificielles

Les analyses chimiques réalisées sur les éprouvettes de ténacité CT25 rompues dans le domaine ductile montrent que la teneur en carbone de ces éprouvettes est comprise majoritairement entre 0,255 % et 0,275 % avec la répartition présentée sur la Figure 39.

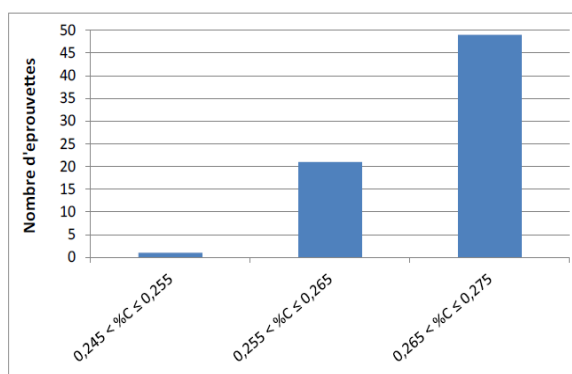


Figure 39 : Teneur en carbone des éprouvettes de ténacité testées dans le domaine ductile

4.3.7. Mécanismes de rupture

4.3.7.1. *Dans le domaine de la transition fragile-ductile*

Areva NP a fait procéder à l'examen des faciès de rupture de 108 éprouvettes de résilience et ténacité prélevées au quart, à mi et aux trois quarts de l'épaisseur des calottes sacrificielles UK et UA par différents laboratoires [37]. Les éprouvettes ont été sélectionnées par Areva NP sur la base du niveau de ténacité atteint par l'éprouvette. Dans le domaine de transition, les éprouvettes présentant les ténacités les plus basses ont été sélectionnées ainsi qu'un échantillon d'éprouvettes ayant une ténacité moyenne ou élevée par rapport aux valeurs obtenues à la température testée [13] [37].

Areva NP retient des expertises menées que, globalement, le faciès de rupture des éprouvettes de ténacité testées dans le domaine de la transition fragile-ductile est typique d'une rupture par clivage. Sur quelques éprouvettes présentant une ténacité basse, la présence isolée de facettes de rupture intergranulaire a été observée, sans être associée nécessairement à la zone d'initiation de la rupture. La présence d'inclusions, telles que des sulfures de manganèse ou des aluminates, a également été rapportée. Toutefois, ces inclusions ne sont pas clairement identifiées comme étant des sites d'initiation de la rupture.

Par ailleurs, Areva NP note que, dans le lot d'éprouvettes expertisées, le faciès de rupture d'une éprouvette de ténacité prélevée au quart de l'épaisseur de la calotte supérieure UK et testée à -80 °C présente une particularité au niveau du site d'initiation de la rupture. La zone de pré-fissuration par fatigue présente une zone de rupture intergranulaire importante, qu'Areva NP identifie comme étant vraisemblablement à l'origine de l'amorçage de la rupture par clivage.

4.3.7.2. *Dans le domaine ductile*

Les faciès de rupture des éprouvettes de ténacité CT25 examinées présentent toutes les mêmes caractéristiques : une zone d'amorçage par déchirure ductile puis une zone de rupture par clivage comme identifié sur la Figure 40. La présence de sulfure de manganèse y a également été observée.



Figure 40 : Faciès de rupture typique d'une éprouvette CT25 testée à 50 °C et 330 °C

4.3.8. Position du rapporteur sur les propriétés mécaniques en zone ségrégée

4.3.8.1. *Caractère suffisant des connaissances apportées par le programme d'essais*

Le rapporteur souligne l'ampleur du programme d'essais mené par Areva NP pour caractériser le comportement du matériau en zones de ségrégation majeure positive. Au total, 1722 essais mécaniques ont été menés : 145 essais de traction, 96 essais Pellini, 574 essais Charpy, 907 essais de ténacité, dont 800 pour caractériser le domaine de la transition fragile-ductile.

Ces essais ont été complétés par 1503 analyses chimiques sur les éprouvettes d'essais rompues, prélevées à différentes profondeurs dans la zone ségrégée des calottes sacrificielles, afin d'examiner l'étendue des zones ségrégées dans l'épaisseur des calottes. Les éprouvettes rompues ont également fait l'objet de fractographie pour déterminer les mécanismes de rupture en zone fortement ségrégée.

Pour le rapporteur, ce programme présente un volume d'essais comparable à celui des grands programmes de recherche internationaux multipartites menés depuis 1970 pour caractériser le comportement des aciers ferritiques utilisés pour la fabrication des cuves de réacteurs. Par ce programme, Areva NP est en outre allé au-delà de ce qui est couramment pratiqué pour la qualification d'une nouvelle gamme de fabrication.

De plus, le rapporteur note que le nombre d'essais de ténacité réalisés permet de couvrir le domaine de distribution statistique de la ténacité, attendu en théorie, pour un acier ferritique, et que les données de ténacité ne s'écartent pas significativement de la distribution théorique. Le nombre d'essais de ténacité réalisés apparaît donc suffisant pour évaluer le comportement à la rupture d'un acier avec une teneur en carbone plus importante qu'attendue.

Le rapporteur considère que les connaissances apportées par ce programme d'essais sont suffisantes pour apprécier les propriétés du matériau dans la zone ségrégée et étudier la tenue mécanique des calottes de cuve du réacteur EPR de Flamanville aux températures auxquelles elles seront soumises en conditions normales et perturbées et seraient potentiellement soumises en conditions accidentelles. Plus précisément, la variation des propriétés mécaniques au sein des zones de ségrégation positives a été déterminée en tenant compte de la variation de la

composition chimique et de la vitesse de trempe dans ces zones. Des propriétés mécaniques minimales pour les zones ségréguées des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville peuvent être déterminées au regard des caractéristiques en traction, de la RT_{NDT} mesurées en zone de recette de ces calottes et de l'évolution des propriétés du matériau avec la teneur en carbone.

Enfin, ce programme d'essais a permis de vérifier que les mécanismes de rupture en zone fortement ségréguée ne diffèrent pas de ceux attendus pour un acier ferritique. Le rapporteur constate par ailleurs que la présence d'une ségrégation résiduelle du carbone est bien à l'origine de la modification des propriétés mécaniques.

La base de données d'Areva NP, constituée des résultats du programme sacrificiel, a été mise à la disposition du rapporteur afin qu'il puisse mener de manière indépendante sa propre interprétation des résultats d'essais. Aucun écart notable n'a été identifié entre l'exploitation faite par Areva NP et l'exploitation faite par le rapporteur des résultats issus du programme d'essai.

4.3.8.2. Impact de la teneur en carbone sur les propriétés mécaniques du matériau

De manière générale, le rapporteur note que les limites d'élasticité et à rupture, les différentes températures de transition (RT_{NDT} , T_{68J} , T_{CV}) et la température de référence T_0 évoluent de manière similaire : tous ces paramètres augmentent avec la teneur en carbone. Ceci confirme qu'une élévation de la teneur en carbone induit un durcissement de l'acier, qui conduit à un abaissement de la résistance aux chocs (ou résilience) et de la résistance à l'amorçage de défaut (ou ténacité) comparativement à la zone de recette. Cet abaissement des paramètres de mécanique de la rupture est plus marqué dans le domaine de la transition fragile-ductile, que dans le domaine ductile.

Les limites d'élasticité et limites à rupture en zones ségréguées sont supérieures à celles mesurées en zone de recette. Les valeurs mesurées en zone de recette constituent les valeurs minimales et sont supérieures aux valeurs minimales prescrites par le code RCC-M à considérer dans les analyses de mécanique. L'allongement à rupture à 20 °C est peu sensible à la teneur en carbone et reste supérieur ou égal à la valeur mentionnée par l'arrêté ESPN en référence [3] qui est de 20 %. Ceci est donc jugé satisfaisant.

Le rapporteur considère que, les propriétés en traction ($R_{p0,2}$ et R_m) étant plus élevées que celles de recette, les conclusions du dossier de conception ne sont pas remises en cause en zone ségréguée s'agissant des risques d'instabilité plastique, de déformation excessive et de déformation progressive.

La T_{NDT} est plus élevée en zone ségréguée qu'en zone de recette et apparaît supérieure à la valeur maximale retenue à la conception de -20 °C. Le constat de cette différence constitue la réponse d'Areva NP à la demande n° 9³² de la lettre de l'ASN en référence [7]. Conformément à cette demande, Areva NP a également apporté des explications sur la différence de T_{NDT} observée. Ces explications tendent à montrer que l'augmentation de la T_{NDT} est liée, en partie, à la nature de l'essai Pellini : un essai dynamique à déformation imposée. L'augmentation de la limite d'élasticité

³² Demande n° 9 : « L'ASN vous demande que la démarche permette d'apprécier :

- le caractère enveloppe de la courbe ZG6110 du RCC-M indexée sur la RT_{NDT} de fin de vie retenue à la conception diminuée du décalage lié au vieillissement thermique et sous déformation ainsi que de la différence maximale entre la RT_{NDT} de recette des calottes de Flamanville 3 et celle de chacune des deux calottes sacrificielles vis-à-vis des valeurs de ténacité mesurées ;
- la cohérence de la T_{NDT} locale avec la valeur retenue à la conception. »

en zone ségréguée conduit selon Areva NP à une sollicitation plus importante du défaut et accroît également l'énergie à dissiper lors de la propagation du défaut. De plus, le durcissement du matériau est amplifié par la vitesse de déformation. Le rapporteur ne se prononce pas sur les arguments mis en avant à ce propos, dont les fondements, présentés au cours de l'instruction, sont, au final, absents du dossier d'Areva NP.

Ces explications ne permettent cependant pas d'attribuer à ce seul effet de durcissement la totalité de la variation de la T_{NDT} constatée expérimentalement entre la zone de recette et la zone ségréguée, ni de préciser dans quelle proportion il y contribue.

À cet égard, le rapporteur souligne que, du point de vue du comportement du matériau, l'augmentation de la température de transition à ductilité nulle, T_{NDT} , entre la mesure en zone ségréguée et celle en zone de recette, est cohérente avec la fragilisation du matériau marquée par l'augmentation des autres températures de transition, T_{68j} , T_{CV} et T_0 .

Le rapporteur retient qu'en zone de recette comme en zone ségréguée, la RT_{NDT} est égale à la T_{NDT} . La température de transition RT_{NDT} et le décalage de cette température induit par l'élévation de la teneur en carbone (ΔRT_{NDT}) au sein d'une même calotte ségréguée varie peu entre le quart-épaisseur et la mi-épaisseur (Figure 31 et Figure 32).

4.3.8.3. Amélioration de la trempabilité liée à la teneur en carbone et effet de trempe

Le rapporteur constate, sur les résultats du programme d'essais, l'effet antagoniste de la teneur en carbone et de la vitesse de trempe sur les propriétés mécaniques de l'acier et l'amélioration de la trempabilité pour les teneurs en carbone élevées.

Le rapporteur note en particulier que, pour les calottes supérieure et inférieure UA, la température de transition T_{68j} et la température de référence T_0 évoluent notablement des trois quarts de l'épaisseur à la mi-épaisseur, mais n'évoluent pas significativement entre la mi-épaisseur et le quart de l'épaisseur malgré une teneur en carbone qui augmente au sein de ces calottes sacrificielles (Figure 28, Figure 35), et ce de manière analogue à la T_{NDT} (Figure 31). Pour la température de référence T_0 , l'évolution est au plus de 5 °C, équivalent à l'incertitude sur ce paramètre. Le constat est identique pour les ΔT_{68j} et ΔT_0 (Figure 29 et Figure 35).

L'interprétation des résultats de ténacité menée par le rapporteur conduit au même constat. À vitesse de trempe identique, la température de référence T_0 augmente fortement pour des teneurs en carbone comprises entre 0,18 % et 0,25 %. La pente de la courbe s'infléchit ensuite pour les concentrations en carbone supérieures ou égales à 0,25 % et la valeur de T_0 plafonne, traduisant la meilleure trempabilité aux teneurs en carbone comprises entre 0,25 % et 0,28 % (Figure 41).

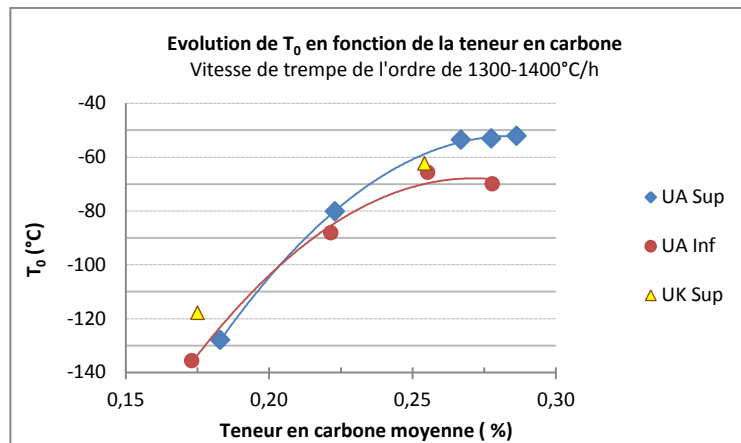


Figure 41 : Évolution de la température de référence T_0 en fonction de la teneur en carbone issue de l'exploitation par le rapporteur des résultats de ténacité du programme d'essais

Ainsi, la meilleure trempabilité due à l'augmentation de la teneur en carbone compense la fragilisation due à une teneur en carbone plus élevée. Ceci est à prendre en considération pour analyser l'impact sur la ténacité d'une teneur en carbone, pouvant être comprise entre 0,28 % et 0,32 %, incertitudes comprises, entre le quart de l'épaisseur et la peau externe, qui est une zone mieux trempée.

Enfin, le rapporteur retient également que la vitesse de trempe à mi-épaisseur d'une calotte inférieure est plus élevée que pour une calotte supérieure. Ainsi, la ténacité du matériau à mi-épaisseur d'une calotte inférieure est sensiblement plus élevée que celle à mi-épaisseur d'une calotte supérieure.

4.3.8.4. Mécanisme de rupture en zone ségréguée

À l'examen des faciès de rupture des éprouvettes de ténacité, le rapporteur considère que les mécanismes de rupture en zone ségréguée sont globalement ceux attendus pour un acier ferritique : rupture par clivage dans le domaine de la transition fragile-ductile et amorçage de la rupture par déchirure ductile dans le domaine ductile. La présence isolée et marginale de facettes de rupture intergranulaire a également été rapportée sur plusieurs éprouvettes expertisées.

Parmi l'ensemble des éprouvettes expertisées, l'éprouvette CT1UST310 présente toutefois une particularité. La zone de pré-fissuration par fatigue de cette éprouvette montre une zone importante de rupture intergranulaire, très probablement à l'origine de l'initiation de la rupture par clivage. Aucune explication n'a été fournie sur l'origine de cette zone de rupture.

Le rapporteur considère qu'Areva NP doit mener les investigations nécessaires pour déterminer l'origine de la rupture intergranulaire observée sur l'éprouvette CT1UST310. Le rapporteur note toutefois que la ténacité de cette éprouvette est 50 % supérieure à la valeur minimale déterminée sur la courbe du RCC-M indexée sur la RT_{NDT} de recette.

Afin de caractériser plus précisément la composition de la zone présentant ces faciès intergranulaires, ainsi que le mode de rupture, Areva NP s'engage à réaliser [80] :

- des observations du faciès de l'éprouvette CT1UST310 par microscopie électronique à balayage ;
- des analyses par micro-sonde afin de caractériser chimiquement la zone présentant les faciès intergranulaires.

Areva NP s'engage à fournir les résultats de cette expertise fin septembre 2017. Le rapporteur estime cet engagement satisfaisant. Il permettra en outre à Areva NP d'intégrer les résultats obtenus dans sa demande d'autorisation de mise en service de la cuve.

4.3.8.5. Conservatisme de la courbe de ténacité ZG6110 du code RCC-M pour définir une ténacité minimale en zone ségrégee

Conformément aux demandes n° 9³² et n° 10³³ de la lettre de l'ASN en référence [7], le rapporteur note qu'Areva NP a déterminé :

- la température définie comme la RT_{NDT} de fin de vie de conception, diminuée du décalage lié au vieillissement thermique et sous déformation, cumulée à la différence maximale entre la RT_{NDT} de recette des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville et celles de chacune des trois calottes sacrificielles. Cette dernière est égale à la RT_{NDT} de recette augmentée de 35 °C ;
- la température d'indexation de la courbe RCC-M permettant d'envelopper de manière optimale les mesures de ténacité en zone ségrégee ;
- la T_{NDT} en zone ségrégee ;
- les températures résultant des essais Charpy en zone ségrégee : T_{68J} et $T_{CV} -33^{\circ}C$.

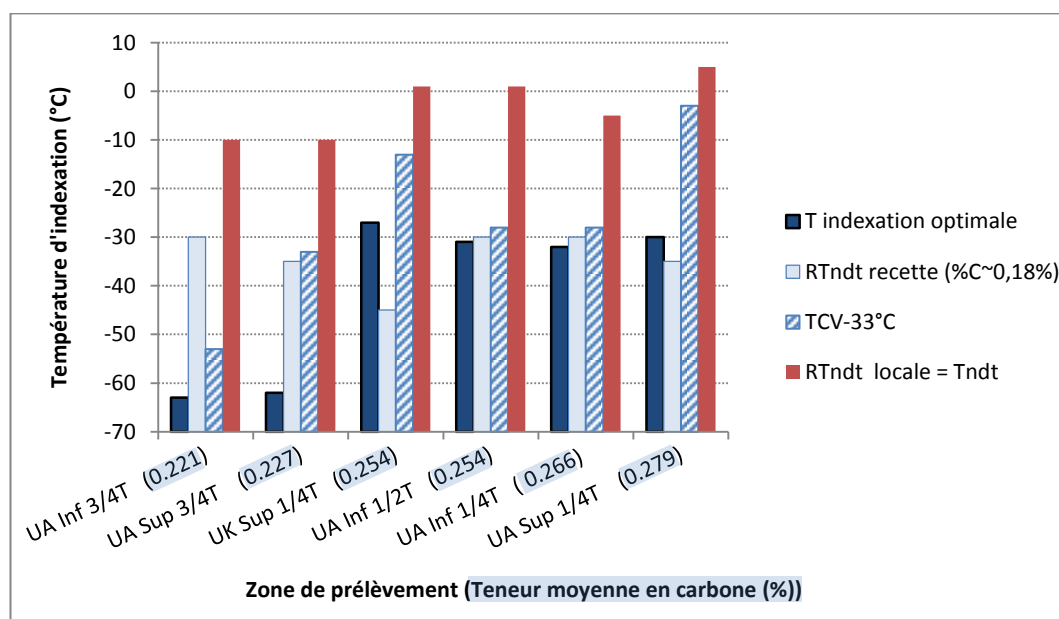


Figure 42 : Comparaison des différentes températures d'indexation de la courbe du RCC-M examinée au regard de la teneur moyenne en carbone mesurée sur éprouvette³⁴, à vitesse de trempe comparable (~1300-1400 °C/h)

³³ Demande n° 10 : « L'ASN vous demande de déterminer :

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

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

³⁴ La Figure 42 présente une comparaison graphique des valeurs des températures d'indexation obtenues localement à quart, mi et aux trois quarts de l'épaisseur (axe des ordonnées) en fonction des teneurs en carbone (axe des abscisses) et de la vitesse de trempe qui leur sont associées.

Le rapporteur constate que la température d'indexation optimale de la courbe du RCC-M est inférieure aux températures T_{CV-33} et T_{NDT} quelle que soit la profondeur de la calotte où ont été prélevées les éprouvettes, comme le montre la Figure 42. Ceci répond à la demande n° 11³⁵ de la lettre de l'ASN en référence [7].

Le rapporteur constate que la courbe du RCC-M indexée sur la RT_{NDT} de recette ne constitue pas une borne inférieure de toutes les données de ténacité issues des essais sur éprouvettes réalisés en zone ségréguée associée à des vitesses de trempe inférieures à 1500 °C/h. En effet, le positionnement par rapport à cette courbe des 614 données de ténacité issues d'essais sur éprouvettes prélevées en zone ségréguée font apparaître treize données sous la courbe, dont sept issues d'essais sur éprouvettes prélevées à mi-épaisseur. Une majoration de 20 °C de la RT_{NDT} de recette est nécessaire pour couvrir la totalité des données. La température d'indexation optimale de la courbe du RCC-M, pour ce qui concerne la zone ségréguée, est donc égale à la RT_{NDT} de recette augmentée de 20 °C.

Enfin, le rapporteur souligne que l'indexation de la courbe du RCC-M sur la RT_{NDT} en zone ségréguée, égale à la T_{NDT} , permet de préserver le conservatisme associé à la courbe du RCC-M, le décalage de RT_{NDT} étant compris entre 20 °C et 45 °C (Figure 32).

Le rapporteur considère que la courbe du RCC-M indexée sur la température optimale ou la RT_{NDT} en zone ségréguée permet de couvrir les données de ténacité d'une zone présentant des teneurs en carbone pouvant atteindre 0,32 % en peau compte tenu de l'effet de trempe plus favorable entre le quart de l'épaisseur et la peau externe (Figure 41).

4.3.8.6. Ténacité dans le domaine ductile en zone ségréguée

Le rapporteur constate que le palier ductile est abaissé en zone de ségrégation par rapport à la zone de recette. Toutefois, le rapporteur note que la résistance à la déchirure ductile à 50 °C et 330 °C reste supérieure aux valeurs spécifiées par le RCC-M, ce qui est satisfaisant et répond à la demande n° 3³⁶ de la lettre de l'ASN en référence [7].

4.3.9. Transposition des résultats obtenus sur les calottes sacrificielles aux calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville

4.3.9.1. Dossier d'Areva NP

Areva NP a proposé d'estimer la ténacité de chacune des calottes supérieure et inférieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville à partir de la courbe de ténacité du RCC-M indexée sur les températures de fin de vie, définies à partir des résultats du programme d'essais sur les calottes sacrificielles, à savoir :

- une température enveloppe des essais de ténacité, dite T_{env} , transposée aux calottes FA3 et majorée de 15 °C pour tenir compte des phénomènes de vieillissement en service ;

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

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

- une RT_{NDT} définie à partir de la RT_{NDT} maximale mesurée, transposée aux calottes de Flamanville et majorée de 15 °C pour tenir compte des phénomènes de vieillissement en service.

La transposition des résultats d'essais sur calottes sacrificielles aux calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville consiste à couvrir une éventuelle différence de comportement en zone ségréguée entre ces calottes par l'écart maximal entre la RT_{NDT} en zone de recette des calottes sacrificielles et la RT_{NDT} en zone de recette de l'une ou l'autre des calottes de Flamanville, soit +15 °C pour la calotte supérieure et +25 °C pour la calotte inférieure. Pour Areva NP, le facteur de transposition, ainsi défini, est pénalisant [11]. À titre d'exemple, en peau externe de la calotte supérieure FA3, ceci conduit aux formules suivantes :

$$T_{env}(FA3 \text{ Sup})_{\text{fin de vie}} = \max_{UK \text{ Sup}, UA \text{ Inf}, UA \text{ Sup}} (T_{env}) + \text{facteur de transposition} + \text{effet du vieillissement}$$

$$= -21 + 15 + 15 = 9 \text{ °C}$$

$$RT_{NDT}(FA3 \text{ Sup})_{\text{fin de vie}} = \max_{UK \text{ Sup}, UA \text{ Inf}, UA \text{ Sup}} (RT_{NDT}) + \text{facteur de transposition} + \text{effet du vieillissement}$$

$$= 5 + 15 + 15 = 35 \text{ °C}$$

Le Tableau 38 et le Tableau 39 détaillent le calcul des températures d'indexation de la courbe du RCC-M à retenir dans les analyses de risque de rupture, respectivement pour la calotte supérieure et pour la calotte inférieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville [11].

		Température d'indexation maximale issue du programme d'essais		Facteur de transposition	Viellissement thermique et par déformation	Température d'indexation de la courbe du RCC-M retenue par Areva NP
Calotte supérieure FA3	Peau externe	T_{env}	-21 °C	15 °C	15 °C	9 °C
		RT_{NDT}	5 °C	15 °C	15 °C	35 °C
	Peau interne	T_{env}	-62 °C (*)	15 °C	15 °C	<-5 °C (**)
		RT_{NDT}	-10 °C	15 °C	15 °C	20 °C

(*) valeur maximale aux $\frac{3}{4}$ épaisseur des calottes supérieure et inférieure UA

(**) valeur inférieure à la valeur en fin de vie de conception de -5 °C (obtenue en retenant une RT_{NDT} initiale de conception de -20 °C)

Tableau 38 : Calotte supérieure – Température d'indexation de la courbe RCC-M à retenir pour l'analyse du risque de rupture brutale

		Température d'indexation maximale issue du programme d'essais		Facteur de transposition	Viellissement thermique et par déformation	Température d'indexation de la courbe du RCC-M retenue par Areva NP
Calotte inférieure FA3	Peau externe	T_{env}	-21 °C	25 °C	15 °C	19 °C
		RT_{NDT}	5 °C	25 °C	15 °C	45 °C
	Peau interne	T_{env}	-62 °C (*)	25 °C	15 °C	<-5 °C (**)
		RT_{NDT}	-10 °C	25 °C	15 °C	30 °C

(*) valeur maximale aux $\frac{3}{4}$ de l'épaisseur des calottes supérieure et inférieure UA

(**) valeur inférieure à la valeur fin de vie de conception de -5 °C (obtenue en retenant une RT_{NDT} initiale de conception de -20 °C)

Tableau 39 : Calotte inférieure - Température d'indexation de la courbe RCC-M à retenir pour l'analyse du risque de rupture brutale

4.3.9.2. Position du rapporteur

En ce qui concerne la définition de la température d'indexation de la courbe du RCC-M, le rapporteur note qu'Areva NP retient un facteur de transposition des résultats d'essais obtenus sur les calottes sacrificielles aux calottes de Flamanville. Ce facteur est défini comme l'écart maximal entre la RT_{NDT} de recette des calottes sacrificielles et celles des calottes de Flamanville. Il est de +15 °C pour la calotte supérieure et de +25 °C pour la calotte inférieure.

Au regard des résultats du programme d'essais, le rapporteur estime qu'une température d'indexation de la courbe du RCC-M établie en considérant la RT_{NDT} de recette de chaque calotte de Flamanville, majorée du décalage maximal observé en zone ségréguée par rapport à la RT_{NDT} de recette des calottes UA et UK, et du décalage dû aux phénomènes de vieillissement est la manière pertinente de définir une ténacité minimale et cohérente avec l'approche classiquement employée pour tenir compte d'une fragilisation durcissante.

En effet, le choix historique d'indexer la courbe du RCC-M sur la RT_{NDT} de recette relevait du souhait de disposer d'une courbe unique pour toute une gamme de nuances d'acier ferritique, intégrant intrinsèquement la différence de comportement entre pièces par le biais de l'indexation sur la RT_{NDT} de recette. En d'autres termes, la RT_{NDT} de recette constitue le paramètre de transposition. La transposition d'une calotte à une autre est donc assurée dès lors que la température d'indexation est définie à partir de la RT_{NDT} de recette ou de l'écart par rapport à cette RT_{NDT} de recette. À titre d'exemple, pour la calotte supérieure de Flamanville, ceci conduit aux températures d'indexation suivantes.

En peau externe

$$\begin{aligned} T_{env}(\text{FA3 Sup})_{\text{fin de vie}} &= RT_{NDT} \text{ recette (FA3 Sup)} \\ &+ \max_{\text{UK Sup, UA Inf, UA Sup}} (T_{env} - RT_{NDT} \text{ recette}) + \text{effet du vieillissement} \\ &= -30 + 20 + 15 = 5 \text{ °C} \\ RT_{NDT}(\text{FA3 Sup})_{\text{fin de vie}} &= RT_{NDT} \text{ recette (FA3 Sup)} \\ &+ \max_{\text{UK Sup, UA Inf, UA Sup}} (RT_{NDT, ZS} - RT_{NDT} \text{ recette}) + \text{effet du vieillissement} \\ &= -30 + 45 + 15 = 30 \text{ °C} \end{aligned}$$

En peau interne

$$\begin{aligned} RT_{NDT}(\text{FA3 Sup})_{\text{fin de vie}} &= RT_{NDT} \text{ recette (FA3 Sup)} \\ &+ \max_{\text{UK Sup, UA Inf, UA Sup}} (RT_{NDT, ZS} - RT_{NDT} \text{ recette}) + \text{effet du vieillissement} \\ &= -30 + 15 = -15 \text{ °C} \end{aligned}$$

Au final, le rapporteur retient que les températures d'indexation retenues par Areva NP sont pénalisantes par rapport à celles définies selon l'approche du rapporteur.

En conclusion, le rapporteur estime que le programme d'essais a permis de vérifier que les mécanismes de rupture en zone fortement ségréguée ne diffèrent pas de ceux attendus pour un acier ferritique. La présence de la ségrégation conduit à une augmentation de la température de transition.

S'agissant d'un composant dont la rupture n'est pas étudiée dans le rapport de sûreté de l'installation, le rapporteur considère qu'il était nécessaire qu'Areva NP apprécie les propriétés du matériau des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville à partir des résultats de son programme d'essais, selon une démarche éprouvée et présentant un

conservatisme dont la garantie est indiscutable. En conséquence, le fait qu'Areva NP a retenu une augmentation de la température de transition entre le mode de rupture fragile et le mode ductile égale au décalage maximal de la température de référence à ductilité nulle (RT_{NDT}) entre la zone ségréguée et la zone de recette des calottes testées est satisfaisant.

5. Chargements thermomécaniques

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

Le schéma en Annexe 3 présente sommairement le circuit primaire et les systèmes qui peuvent s'y connecter, ainsi que les entrées et sorties d'eau vers et hors le circuit primaire pouvant créer des transitoires thermohydrauliques.

Le caractère conservatif, tant en termes d'exhaustivité que de description, des transitoires thermohydrauliques retenus afin de définir les chargements thermomécaniques utilisés en tant que données d'entrée de l'analyse de la résistance mécanique des calottes, notamment l'analyse du risque de rupture brutale, doit faire l'objet d'une attention particulière. Le présent chapitre traite ainsi la sélection des situations³⁷ qui sollicitent le plus sévèrement les calottes inférieure (fond de cuve) et supérieure (couvercle) et leurs descriptions thermohydrauliques (évolutions temporelles de la température, de la pression et du débit), appelées caractérisations.

Les situations les plus sévères pour le risque d'amorçage de défaut sont les situations conduisant à leur ouverture. Il s'agit des situations associées aux cas de choc thermique chaud pour des défauts situés en peau externe des calottes et aux cas de choc thermique froid pour des défauts potentiels situés en peau interne (voir Figure 43).

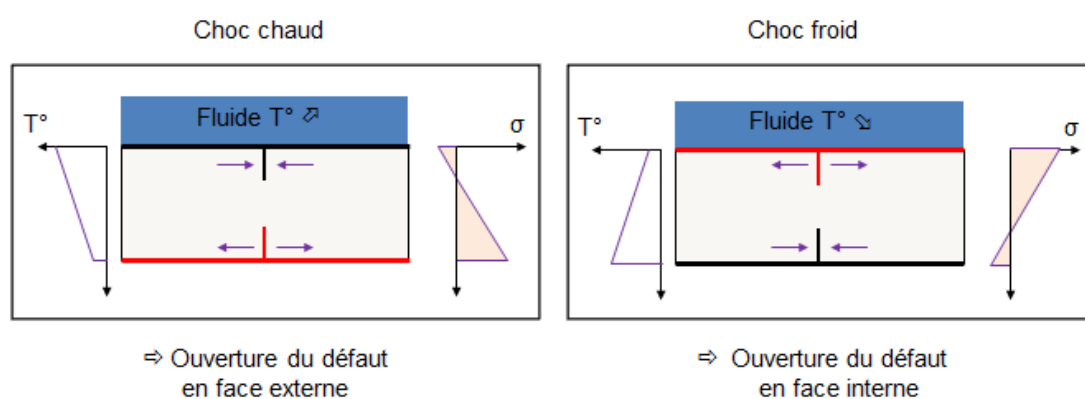


Figure 43 : Effet d'un choc thermique et d'une pression sur un défaut perpendiculaire à la peau

³⁷ Les dossiers des situations (DDS) identifient l'ensemble des situations normales, perturbées, incidentelles et accidentelles dans lesquelles peut se trouver le circuit primaire principal et donc la cuve. Ils fournissent les chargements thermomécaniques à considérer pour la justification du dimensionnement mécanique des composants du réacteur. Les situations sont classées par catégorie en fonction de leur probabilité d'occurrence. Il y a quatre catégories de situations : la première correspond à la situation de fonctionnement permanent, la 2^e couvre le fonctionnement normal et perturbé, la 3^e couvre les situations exceptionnelles et la 4^e les situations accidentelles hautement improbables.

5.1. Paramètres thermohydrauliques pertinents

Une situation se définit par un évènement initiateur et le transitoire thermohydraulique qui en résulte. Ce transitoire est caractérisé par des valeurs de pression, de température du fluide et de débit, variables dans le temps, qui génèrent un chargement sur les structures :

- l'évolution de la pression induit des contraintes mécaniques dans les équipements ;
- les évolutions de température du fluide induisent des champs de température inhomogènes dans les structures (c'est-à-dire des gradients de température), qui induisent eux-mêmes des contraintes supplémentaires liées aux dilatations thermiques différentielles ;
- le coefficient d'échange thermique entre le fluide et la structure, principalement dépendant du débit du fluide, conditionne l'importance du flux thermique appliqué à la structure en fonction de la différence de température entre le fluide et la paroi.

Une caractérisation conservatrice du transitoire thermohydraulique générant des chargements sur la structure est donc définie par des variations maximisées de la température du fluide (amplitude maximisée du choc thermique) ainsi que par une pression et un coefficient d'échange maximisés.

Pour le risque de rupture dans le domaine de transition fragile-ductile, le cas le plus pénalisant est, de manière générale, celui pour lequel la température initiale (pour les chocs chauds) ou finale (pour les chocs froids) est la plus basse possible. En effet, plus la température est basse, plus la ténacité du matériau est basse.

5.2. Situations de choc chaud

Areva NP a transmis la note en référence [47] en juillet 2015 pour justifier l'absence de risque de rupture brutale pour des défauts potentiels débouchant en surface externe des calottes. Au cours de l'instruction, Areva NP a transmis par la suite la note de synthèse en référence [43] en décembre 2016, dont plusieurs hypothèses ont été considérées par le rapporteur comme ne permettant pas de couvrir l'ensemble du domaine de variation des paramètres thermohydrauliques relatifs aux situations retenues par Areva NP. Cette note a donc été révisée en référence [44]. Cette dernière présente la démarche de sélection des situations de choc chaud les plus sollicitantes ainsi que la description thermohydraulique des situations finalement retenues.

5.2.1. Identification des situations de choc chaud retenues

L'identification des transitoires de choc chaud s'appuie sur la liste conventionnelle du dossier des situations (DDS) du circuit primaire principal (CPP) (document en référence [45] pour la 2^e catégorie et en référence [46] pour les 3^e et 4^e catégories). La liste des situations issue des dossiers des situations a été complétée par des situations additionnelles conduisant à des transitoires de choc chaud pénalisants pour les défauts potentiels situés en peau externe des calottes. La démarche de recherche de ces situations additionnelles développée par Areva NP s'articule selon trois phases :

- phase 1 : identification des phénomènes physiques conduisant au refroidissement de la cuve ;
- phase 2 : identification des phénomènes physiques conduisant au réchauffement de la cuve par injection de fluide à une température élevée ;
- phase 3 : identification des scénarios plausibles correspondants (refroidissement suivi d'un réchauffement de la cuve) afin de retenir les situations les plus pénalisantes qui seront étudiées.

En fonction de l'état initial du réacteur, deux possibilités de survenue de choc chaud sont identifiées :

- la première concerne toutes les situations pour lesquelles la température des calottes est initialement élevée avant de subir successivement un choc froid, puis un choc chaud. Il s'agit alors d'identifier les sources froides pouvant arriver rapidement au contact des calottes, puis de même pour les sources chaudes. Ces situations sont initiées en état A³⁸ ou B³⁹ (état initial sur générateurs de vapeur) ;
- la seconde concerne toutes les situations initiées en état froid (état C⁴⁰ sur le système de refroidissement à l'arrêt RIS-RA⁴¹) et pour lesquelles les calottes subissent un choc chaud sans choc froid préalable⁴².

Cette démarche est appliquée séparément à la calotte inférieure et à la calotte supérieure de la cuve. En effet, pour certains événements initiateurs, les chargements peuvent différer, voire n'affecter qu'une calotte.

À la suite de l'application de cette démarche, Areva NP a identifié trois situations additionnelles aux dossiers des situations, en 3^e et 4^e catégories :

- pour la calotte inférieure, la connexion du système de refroidissement à l'arrêt (RIS-RA en mode RA) suite à une petite brèche primaire initiée en état A ou B, situation qui relève de la 3^e catégorie ;
- pour la calotte inférieure, la reprise de la circulation naturelle (RCN) suite à une petite brèche primaire initiée en état A ou B, situation qui relève de la 3^e catégorie ;
- pour les calottes inférieure et supérieure, la perte du refroidissement par le RIS-RA en mode RA initiée en état C, situation qui relève de la 4^e catégorie.

5.2.2. Caractérisation des situations de choc chaud

La caractérisation des situations de choc chaud issues des dossiers des situations en références [45] et [46] prend en compte :

- un échange thermique parfait entre le fluide et la paroi (coefficient d'échange infini) pour l'ensemble des situations ;
- la température en branche froide de la boucle primaire la plus basse pour la calotte inférieure ;
- la température en branche chaude, la température du liquide ou de la vapeur du dôme (volume sous le couvercle de cuve) en fonction de la situation étudiée (avec ou sans formation de vapeur sous le dôme et avec ou sans renoyage) pour la calotte supérieure.

Les transitoires les plus sollicitants se produisent, pour la calotte supérieure, lors de la situation de 2^e catégorie 20A345b du dossier des situations (fluctuations non programmées entre l'arrêt à chaud et l'arrêt à froid) et, pour la calotte inférieure, lors de la situation de 3^e catégorie 3.6.1a (petite rupture de tuyauterie vapeur avec perte totale des alimentations électriques externes).

³⁸ Réacteur en puissance, en arrêt à chaud et arrêt intermédiaire sur générateurs de vapeur ($P_{\text{primaire}} > 130$ bar)

³⁹ Arrêt intermédiaire sur générateurs de vapeur ($P_{\text{primaire}} < 130$ bar et $T_{\text{primaire}} > 110$ °C)

⁴⁰ Arrêt intermédiaire sur le circuit RIS-RA en mode RA et arrêt à froid normal. Le circuit primaire est fermé ou entrouvert ($1 \text{ bar} < P_{\text{primaire}} < 32$ bar et 15 °C $< T_{\text{primaire}} < 120$ °C)

⁴¹ Système d'injection de sécurité et de refroidissement à l'arrêt

⁴² En état C sur RIS-RA, la pression maximale au niveau de la branche chaude est de 32 bars, le circuit primaire reste pressurisable et la température primaire est inférieure à 120 °C.

La caractérisation des transitoires de choc chaud additionnels aux dossiers des situations figure en Annexe 5.

Transitoires de choc chaud retenus

Les situations les plus pénalisantes par catégorie, issues à la fois des dossiers des situations et des recherches additionnelles, pour les défauts postulés en paroi externe des calottes sont récapitulées dans le Tableau 40.

	Catégorie	Situation	Désignation	Référence
Calotte supérieure	2	DDS 20A345b	Fluctuations non programmées entre l'arrêt à chaud (AAC) et l'arrêt à froid (AAF) - Faible charge 20A cas 3-4-5	[43] [44]
	3	DDS 3.6.1.a	Petite rupture de tuyauterie vapeur (RTV) sans perte totale des alimentations électriques externes	[43] [44]
	4	Hors DDS Perte RRA	Perte totale du refroidissement par le RIS-RA en mode RA en état C3 pompes primaires à l'arrêt	[43] [44] [47]
Calotte inférieure	2	DDS 20E-1P	Fluctuations non programmées entre AAC et AAF - Grande amplitude 20-1 P	[43] [44]
	3	Hors DDS RCN cat3	Reprise de la circulation naturelle suite à un APRP petite brèche	[43] [44] [47]
		Hors DDS Connexion RRA	Connexion du RIS-RA en mode RA suite à un APRP petite brèche (PB)	[43] [44] [47]
	4	Hors DDS RCN cat4	Reprise de la circulation naturelle suite à un APRP PB sans tenir compte du mélange avec l'IS	[43] [44]

Tableau 40 : Dossier d'Areva NP : Transitoires de choc chaud des dossiers des situations et additionnels aux dossiers des situations

5.3. Situations de choc froid

Dans les notes en références [49] et [51], Areva NP présente les situations de choc froid retenues dans les analyses de stabilité de défauts potentiels aux trois quarts de l'épaisseur en partant de la peau externe ou débouchant en peau interne des calottes inférieure et supérieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville. Comme, à chargement égal, les défauts potentiels en peau interne sont plus sollicités que les défauts équivalents qui seraient enfouis, seul le cas des défauts en peau interne est présenté ci-après.

À la suite de l'instruction technique, Areva NP a complété son dossier relatif aux chocs froids, qui est au final constitué par la note en référence [67].

5.3.1. Identification des situations de choc froid

Les situations considérées par Areva NP sont issues des dossiers des situations, à l'exception de la situation d'éjection d'une grappe de commande qui a été ajoutée au cours de l'instruction technique.

5.3.2. Caractérisation des situations de choc froid

La caractérisation des situations de choc froid prend en compte un coefficient d'échange infini pour la calotte supérieure dans toutes les situations de fonctionnement ainsi que pour la calotte inférieure dans toutes les situations, à l'exception de celles indiquées dans la note en référence

[50] qui incluent notamment les situations induites par des brèches sur le circuit primaire (dites brèches primaires). Pour ces situations, le coefficient d'échange est calculé en fonction des conditions thermohydrauliques du fluide, selon les formulations rappelées en référence [43].

Les règles d'application de la température sont les suivantes :

- pour la calotte inférieure, la température du fluide de la branche froide est appliquée à la paroi interne en toute situation ;
- pour la calotte supérieure, la température du fluide appliquée est :
 - la température de la branche chaude pour toutes les situations de 2^e catégorie et d'épreuves hydrauliques ;
 - la température de la branche chaude pour les situations non bullogènes⁴³ de 3^e et 4^e catégories, sauf dans le cas de l'éjection de grappe où la température liquide est celle à la sortie des guides de grappes de commande ;
 - la température du liquide au niveau du dôme pour les situations sans formation de la bulle de 3^e et 4^e catégories, la température de la vapeur au niveau du dôme pour les situations bullogènes sans renoyage de 3^e et 4^e catégories ;
 - la température de la vapeur au niveau du dôme jusqu'à l'instant du renoyage puis la température du liquide pour les situations bullogènes avec renoyage de 3^e et 4^e catégories.

Les situations les plus pénalisantes (hors situations d'essai) pour le défaut débouchant retenu en peau interne sont rappelées dans le Tableau 41 ci-dessous.

	Catégorie	Situation	Désignation	Référence
Calotte supérieure	2	20A345b	Fluctuations non programmées entre AAC et AAF plage basse	[50]
	3	DDS 3.4.a	Rupture d'un tube de générateur de vapeur	[50]
	4	Hors DDS	Éjection de grappe – Brèche de 45 cm ²	[50]
Calotte inférieure	2	DDS 20E-3P	Surpression à froid monophasique	[50]
	3	DDS 3.8.2	Surpression à froid monophasique suite à une injection de sécurité intempestive	[50]
	4	DDS 4.9.2	Surpression à froid monophasique suite à une injection de sécurité intempestive avec une ligne à grand débit minimal fermée	[50]

Tableau 41 : Dossier d'Areva NP – Transitoires de choc froid du dossier des situations et additionnels aux dossiers des situations

Les situations les plus pénalisantes sont la surpression à froid monophasique suite à une injection de sécurité intempestive en 3^e catégorie pour la calotte inférieure et l'éjection de grappe (brèche de 45 cm²) en 4^e catégorie pour la calotte supérieure.

⁴³ Une situation est dite « bullogène » lorsque les conditions thermohydrauliques dans le volume sous le couvercle de la cuve sont telles qu'une stratification thermique s'y installe et qu'une bulle de vapeur peut potentiellement s'y former.

5.4. Position du rapporteur

Après avoir vérifié l'exhaustivité des situations étudiées par Areva NP pour en identifier les plus pénalisantes, le rapporteur a analysé le conservatisme de la caractérisation (évolutions temporelles de la température, de la pression et du débit) de ces situations. Cette analyse a été réalisée pour les deux calottes de la cuve, inférieure et supérieure, en considérant à chaque fois les situations de choc chaud et de choc froid.

Le rapporteur souligne qu'à la suite de l'examen approfondi de ce dossier et aux nombreux échanges ayant eu lieu au cours de l'instruction, Areva NP a transmis des éléments permettant de compléter son dossier initial et de consolider sa démonstration.

5.4.1. Problématiques communes aux situations de choc chaud et de choc froid

La caractérisation de certaines situations soulevait des questionnements communs aux situations de choc chaud et de choc froid. Il s'agit, d'une part de l'évaluation des coefficients d'échange entre fluide et paroi lorsque ce coefficient d'échange n'est pas supposé infini, d'autre part de l'analyse de la nécessité d'un renforcement des règles d'exploitation pour limiter l'amplitude des chocs thermiques pour les situations de 2^e catégorie. Ces deux points sont détaillés en Annexe 4.

Concernant le coefficient d'échange entre fluide et paroi, le rapporteur considère que les résultats des études de sensibilité fournis par Areva NP en fin d'instruction permettent de s'assurer que le coefficient d'échange est calculé de manière conservative.

Par ailleurs, concernant les situations de 2^e catégorie, les éléments apportés au cours de l'instruction technique conduisent à considérer que les règles de conduite sont suffisantes pour limiter l'amplitude des chocs associés à ces situations. Le rapporteur considère que ces éléments sont satisfaisants et estime donc acceptable de ne pas prévoir de modification des règles de conduite normale pour le réacteur EPR de Flamanville.

Toutefois, dans la mesure où ces règles permettent de limiter l'amplitude des transitoires de choc froid et de choc chaud sur les calottes de cuve pendant le fonctionnement normal et perturbé (situations de 2^e catégorie), le rapporteur considère que les critères correspondants doivent figurer dans les spécifications techniques d'exploitation (STE) des règles générales d'exploitation (RGE).

5.4.2. Situations de choc chaud

5.4.2.1. Démarche d'identification des situations de choc chaud

S'agissant des situations de choc chaud, le rapporteur note que les situations de 2^e catégorie sont toutes issues du dossier des situations. En revanche, en 3^e et 4^e catégories, les situations identifiées ne sont pas issues du dossier des situations sauf pour la calotte supérieure en 3^e catégorie. En effet, Areva NP n'a pas identifié de nouvelle situation de choc chaud additionnelle au dossier des situations en 3^e catégorie pour la calotte supérieure.

Le rapporteur considère satisfaisante, dans le principe, la démarche développée par Areva NP pour identifier les situations menant à des transitoires de choc chaud sur les calottes de cuve.

5.4.2.2. *Pertinence de la caractérisation des situations de choc chaud*

Concernant la caractérisation des situations pénalisantes de choc chaud, de nombreux échanges, résumés en Annexe 5, ont permis à Areva NP de préciser et, lorsque nécessaire, de réviser la caractérisation initialement proposée afin d'en garantir le conservatisme.

Concernant le transitoire correspondant à la connexion du RIS-RA en mode RA, la caractérisation initialement proposée par Areva NP dans la note [43] n'a pas été jugée satisfaisante et a donné lieu à des études de sensibilité relatives à l'impact de la taille de la brèche à l'origine de ce transitoire. Ces études complémentaires ont permis de mettre en évidence l'existence d'un chargement thermomécanique plus important en considérant une taille de brèche plus petite. Areva NP a ainsi défini un nouveau profil de température [44] caractérisant le choc chaud pour cette situation. Le rapporteur a analysé ce nouveau profil (cf. Annexe 5) et estime ce dernier acceptable.

Concernant le transitoire correspondant à la reprise de la circulation naturelle à la suite d'une brèche primaire, sa caractérisation a également fortement évolué au cours de l'instruction. Les interrogations du rapporteur ont essentiellement porté sur les phénomènes physiques complexes et antagonistes qui gouvernent ce transitoire. En effet, un choc chaud est susceptible de se produire à l'instant de la reprise de la circulation naturelle (RCN) qui dépend notamment de la taille de brèche, de la pression et de la température du fluide dans le circuit primaire et des débits de l'injection de sécurité. Ces différents points ont été analysés de manière approfondie par Areva NP qui a réalisé des calculs complémentaires afin de définir et de justifier des profils de température et de débit conservatifs acceptables pour caractériser cette situation [66]. L'analyse de ces éléments est présentée dans l'Annexe 5.

Le rapporteur considère que les chargements thermomécaniques des situations de choc chaud tels que définis à la fin de l'instruction sont acceptables.

5.4.3. Situations de choc froid

5.4.3.1. *Démarche d'identification des situations de choc froid*

S'agissant des situations de choc froid, le rapporteur note que les situations pénalisantes retenues par Areva NP sont issues des dossiers des situations, à l'exception de la situation d'éjection d'une grappe de commande qui a été ajoutée au cours de l'instruction technique. Lors de l'instruction, Areva NP a apporté des éléments visant à conforter l'exhaustivité des situations de choc froid étudiées, notamment l'identification des phénomènes physiques conduisant au refroidissement rapide du fluide dans la cuve et des causes de surpression à froid.

Le rapporteur estime exhaustive la liste des situations les plus pénalisantes ainsi complétée par Areva NP.

Par ailleurs, le rapporteur rappelle que le caractère exhaustif de la liste des situations est réévalué à l'occasion des réexamens de sûreté périodiques de chaque réacteur en fonctionnement. Aussi, EDF s'est engagée, dans la note en référence [85], à vérifier le caractère exhaustif de la liste des situations pour les calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville à l'occasion de la mise à jour des dossiers de référence réglementaires. Cette vérification repose sur la démarche de recherche de transitoires additionnels utilisée pour les réacteurs en fonctionnement.

5.4.3.2. Pertinence de la caractérisation des situations de choc froid

Concernant les chargements thermomécaniques induits par les situations de choc froid, le rapporteur a considéré que la caractérisation de certains transitoires devait être confortée.

Situations de dysfonctionnement du RIS-RA en mode RA

Les situations du fonctionnement perturbé de l'installation (2^e catégorie) correspondent à des dysfonctionnements des régulations ou de certains systèmes. Des situations sont définies dans le dossier des situations pour couvrir l'ensemble de ces dysfonctionnements en se basant sur les variations maximales de pression, de température et de débit envisageables d'après la conception de ces régulations et systèmes.

Le rapporteur a demandé à Areva NP de justifier que les situations du dossier des situations couvraient le dysfonctionnement du RIS-RA en mode RA.

En réponse, Areva NP a précisé [56] que la défaillance de la régulation du RIS-RA était analysée dans le DDS en 2^e catégorie (situations 20E 2C et 20E 3C). Le rapporteur constate que ce transitoire est couvert par l'ouverture intempestive d'une vanne de décharge à l'atmosphère (VDA)⁴⁴. Néanmoins, l'ouverture intempestive d'une VDA ne conduit pas à des températures du circuit primaire inférieures à 100 °C, contrairement à un dysfonctionnement du RIS-RA en mode RA. Le rapporteur en conclut que, si l'ouverture intempestive d'une vanne du système VDA couvre la situation de dysfonctionnement du RIS-RA en mode RA, ce ne peut être qu'en termes d'amplitude de choc thermique, mais pas de température finale.

En fin d'instruction, Areva NP a transmis [83] une étude de la situation de 2^e catégorie d'ouverture intempestive d'une vanne de régulation de température d'un train RIS-RA en mode RA. Cette étude, qui prend en compte un certain nombre d'hypothèses pénalisantes, montre que cette situation est couverte par d'autres situations de 2^e catégorie étudiées par ailleurs dans le dossier d'Areva NP : la situation de surpression à froid monophasique et la situation de variation de faible amplitude de température entre état d'arrêt à chaud et à froid.

Le rapporteur considère ces éléments satisfaisants et n'a pas d'autre remarque à formuler concernant la situation de dysfonctionnement du système RIS-RA de 2^e catégorie.

Situations de surpression à froid

Les situations de surpression à froid, tout en ne constituant pas à proprement parler des chocs thermiques, sollicitent les calottes de cuve à basse température et font donc partie des transitoires à considérer pour le risque de rupture brutale.

La comparaison entre les réacteurs en fonctionnement et le réacteur EPR de Flamanville fait apparaître que les situations considérées sont liées au redémarrage d'une pompe primaire (GMPP) pour les réacteurs en fonctionnement alors que, pour le réacteur EPR de Flamanville, elles sont dues au démarrage intempestif de l'injection de sécurité. Il ne semble donc pas acquis que les surpressions à froid retenues dans le dossier des situations du réacteur EPR de Flamanville couvrent toutes les situations de surpression à froid envisageables. Interrogé sur ce point, Areva NP a cherché [53] à identifier tous les facteurs pouvant générer une surpression (apport de masse et d'énergie dans le circuit primaire), en tenant compte des différences de

⁴⁴ Situation correspondant à la situation 20 1-C initiée soit à l'état d'arrêt, soit en état A ou en état B.

conception entre le réacteur EPR de Flamanville et les réacteurs en fonctionnement. Areva NP en déduit que les situations de surpression de 2^e, 3^e et 4^e catégories retenues dans le dossier des situations sont bien les plus pénalisantes pour le risque de rupture brutale.

Bien que cette démarche soit basée sur des principes satisfaisants, le rapporteur constate que sa déclinaison n'a pas permis d'identifier la situation de surpression à froid à la suite d'une brèche sur le circuit RIS-RA connecté en mode RA. De plus, cette démarche n'a pas permis d'identifier la situation de surpression à froid suite à l'ouverture intempestive d'une soupape du pressuriseur suivie d'une refermeture. En effet, au cours de ces transitoires, l'injection d'eau froide via l'injection de sécurité provoque un choc froid au niveau de la calotte inférieure. Puis, l'isolement de la brèche par l'opérateur dans un cas et la fermeture de la soupape dans l'autre cas provoquent une surpression. À la suite de ce constat, Areva NP a complété son dossier avec la caractérisation de ces situations dont l'analyse est résumée en Annexe 6. Les caractérisations thermohydrauliques retenues sont jugées satisfaisantes par le rapporteur.

Enfin, le rapporteur a terminé son analyse par celle de la caractérisation des transitoires de choc froid les plus pénalisants en 3^e et 4^e catégories pour les calottes supérieure et inférieure. La plupart des situations du dossier des situations n'affecte pas la calotte supérieure dans la mesure où elle reste à une température supérieure à celle du palier ductile du matériau (à savoir 100 °C). Les transitoires les plus pénalisants pour la calotte supérieure sont la brèche primaire, les situations de surpression à froid et l'éjection de grappe (EDG). Seule l'analyse de la brèche primaire est présentée ci-après, l'analyse des autres situations étant synthétisée en Annexe 6.

Situation de 3^e catégorie de brèche primaire

L'apparition d'une brèche sur le circuit primaire provoque la mise en service de l'injection de sécurité qui compense rapidement le débit perdu à la brèche. Ce système injecte donc de l'eau froide dans le circuit primaire qui, en pénétrant dans la descente annulaire de la cuve, provoque un choc thermique sur la paroi de celle-ci et notamment sur la calotte inférieure.

Pour les tailles de brèche classées en 3^e catégorie, le débit d'injection de sécurité est suffisant pour remplir complètement le circuit primaire, y compris le dôme de la cuve, et ce malgré la fuite à la brèche. L'arrivée d'eau froide peut alors provoquer également un choc froid sur la calotte supérieure.

Les hypothèses retenues pour analyser cette situation visent à maximiser la vitesse de refroidissement. Ainsi, la brèche étudiée est située en branche chaude, le débit d'injection d'eau froide par l'injection de sécurité est maximisé et la puissance résiduelle du cœur est minimisée. Les différentes actions de l'opérateur sont par ailleurs prises en compte.

Une seule configuration de petite brèche primaire (en termes de position, nombre de files d'injection de sécurité disponibles, puissance résiduelle, etc.) par taille considérée, à savoir diamètre 2,5 cm (section 5 cm²) et diamètre 5 cm (section 20 cm²), est retenue dans le dossier des situations. Par ailleurs, la taille de brèche maximale étudiée en 3^e catégorie est de 20 cm² (équivalent à deux pouces) sur le réacteur EPR, à comparer à 45 cm² (équivalent à trois pouces) pour les réacteurs en fonctionnement. La vitesse de refroidissement n'étant pas le seul paramètre thermohydraulique à intervenir dans l'étude de mécanique, le rapporteur a interrogé Areva NP sur le caractère suffisant du cas étudié et sur l'influence de la taille de brèche sur les chargements thermomécaniques.

À cet égard, le rapporteur a réalisé, pour la calotte inférieure, des études de sensibilité à la taille de

brèche jusqu'à 45 cm², aux hypothèses maximisant le dénoyage (paramètre intervenant dans le calcul de la température du fluide après l'arrêt de la circulation naturelle) et aux actions de l'opérateur. Il s'avère que certains cas sont légèrement plus pénalisants que le cas présenté dans le dossier des situations. Cependant, la température du fluide à la paroi de la calotte inférieure est calculée avec la corrélation CREARE⁴⁵, qui a été établie pour minimiser la température à l'entrée de la cuve. Ce choix comporte donc un conservatisme pour la température du fluide arrivant au niveau de la calotte inférieure compte tenu de possibles mélanges et réchauffages intervenant dans la cuve. **Le rapporteur considère donc acceptable la caractérisation de la situation de petite brèche primaire pour la calotte inférieure.**

Concernant la calotte supérieure, la caractérisation de cette situation a été établie sur la base d'un calcul mené avec le logiciel système CATHARE qui utilise des modèles ponctuels dits « 0D » pour représenter les parties hautes de la cuve, notamment le dôme où se trouve la calotte supérieure. Au moment de la pénétration de l'eau froide de l'injection de sécurité via les ajutages d'aspersion et à la sortie des guides de grappe (cf. Figure 44) située en partie haute du dôme, des phénomènes complexes tridimensionnels peuvent apparaître (notamment des boucles de recirculation du fluide). Le rapporteur considère que la modélisation ponctuelle retenue par Areva NP ne permet pas de représenter ces phénomènes. Le caractère pénalisant de la température du fluide ainsi calculée au niveau de la calotte supérieure n'est donc pas acquis.

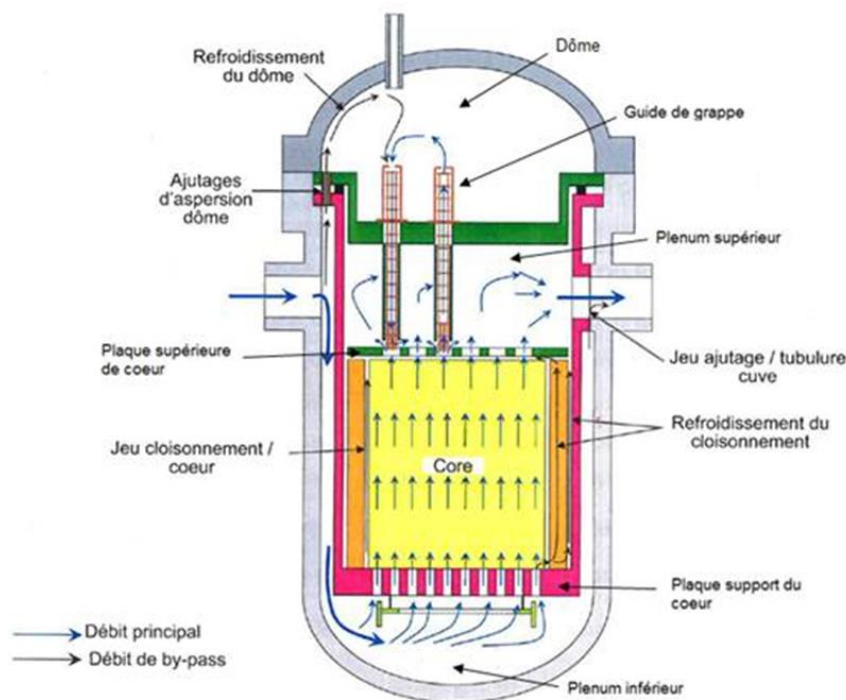


Figure 44 : Débit principal et débit de contournement du cœur en fonctionnement normal

⁴⁵ La corrélation CREARE est utilisée pour évaluer une température minimale de l'eau à la paroi de la cuve dans les cas où la circulation naturelle est interrompue suite à la vidange partielle du circuit primaire. Elle est basée sur l'hypothèse que la température du fluide à la paroi interne de la cuve est celle d'un volume dit de mélange, constitué par le volume de fluide primaire contenu dans les branches froides, la descente annulaire et le plenum inférieur, en considérant le mélange parfait de l'eau présente dans ce volume avec l'ensemble des débits d'injections d'eau dans le circuit primaire évalués par le logiciel CATHARE. La corrélation CREARE a été établie sur la base d'essais expérimentaux éponymes.

Sur ce point, Areva NP a estimé [65] que la température liquide dans le dôme estimée à l'aide de la modélisation CATHARE reste conservative.

En effet, Areva NP considère que l'arrivée d'eau froide dans le dôme se traduit par une condensation progressive de la vapeur et une accumulation lente d'eau sous-saturée en partie basse du dôme induisant une forte stratification : liquide sous-saturé en partie basse, couche de liquide saturé à l'interface liquide-vapeur et vapeur au-dessus de l'interface. Lorsque l'interface liquide-vapeur atteint et dépasse la sortie des guides de grappe, l'interaction directe liquide-vapeur disparaît et les échanges n'ont lieu qu'au niveau de la couche de liquide saturé à l'interface. Lorsque l'interface liquide-vapeur atteint le sommet de la calotte supérieure, le liquide en contact avec la surface interne de cette calotte est à saturation. La modélisation simplifiée de CATHARE conduit à une température de mélange comprise entre celle de l'eau froide et celle de l'eau à saturation, ce qui est donc pénalisant.

Le rapporteur a noté les arguments qualitatifs apportés par Areva NP mais a estimé nécessaire de les conforter par des analyses plus approfondies. En effet, lors de la pénétration de l'eau froide dans le dôme, un phénomène de condensation brutal peut apparaître, le dôme étant à cet instant rempli de vapeur surchauffée. Cette condensation brusque de la vapeur surchauffée peut conduire à un appel supplémentaire d'eau froide dans le dôme par les guides de grappe. Une telle dynamique du transitoire, assimilable à un « coup de bélier » de condensation, pourrait conduire à un renoyage rapide du dôme. Le choc thermique sur la calotte supérieure serait donc plus rapide et plus ample que ne le serait le choc thermique résultant de la condensation très progressive d'une bulle en contact avec un volume d'eau thermiquement stratifié dans le dôme dont la surface serait à la température de saturation tel que supposé par Areva NP. Il est important de noter que ces phénomènes physiques peuvent apparaître pour toutes les situations provoquant une vidange du dôme puis son remplissage par l'injection de sécurité.

En fin d'instruction, Areva NP a transmis [84] une évaluation de l'effet du remplissage lent ou rapide du dôme par de l'eau d'injection de sécurité en provenance principalement des guides de grappe et de manière plus limitée par les ajutages d'aspersion. Une étude de sensibilité au coefficient de condensation montre que, même en considérant une condensation rapide de la vapeur, la température du fluide dans le dôme reste supérieure à 100 °C pendant le renoyage. Areva NP en conclut que la calotte supérieure n'est pas sollicitée dans le domaine de la transition fragile-ductile. Toutefois, le rapporteur souligne que ce calcul conserve la modélisation simplifiée qui ne permet pas de représenter les phénomènes physiques précités. En outre, Areva NP a complété cette évaluation par une approche découplée pénalisante en caractérisant ce transitoire par un créneau à partir d'une température initiale de 320 °C jusqu'à un palier prolongé à basse température avec l'hypothèse d'un transfert thermique parfait.

Le rapporteur considère satisfaisantes les évolutions de température découplées retenues par Areva NP dans la mesure où elles permettent de couvrir les situations de dénoyage et le remplissage rapide du dôme suite à la mise en service de l'injection de sécurité en cas de brèche primaire.

5.5. Conclusion du rapporteur

La caractérisation d'un transitoire thermohydraulique générant des chargements sur la structure est définie par des variations maximisées de la température ainsi que par une pression et un coefficient d'échange maximisés. Ces éléments servent de données d'entrée aux analyses mécaniques de rupture brutale.

Les situations de choc chaud et de choc froid susceptibles de provoquer l'amorçage d'un défaut potentiel localisé, respectivement, en peau externe et en peau interne ont fait l'objet d'un examen par Areva NP afin d'identifier les situations jugées les plus pénalisantes pour chaque catégorie et d'en définir le chargement associé. Après avoir vérifié l'exhaustivité des situations étudiées par Areva NP pour en identifier les plus pénalisantes, le rapporteur a analysé la pertinence de la caractérisation (évolutions temporelles de la température, de la pression et du débit) de ces situations pour chaque catégorie afin de vérifier leur caractère conservatif. Cette analyse a été réalisée pour les deux calottes de la cuve, inférieure et supérieure, en considérant les chocs chauds et les chocs froids.

Le rapporteur souligne que, suite à l'examen approfondi de ce dossier et aux nombreux échanges ayant eu lieu au cours de l'instruction, Areva NP a transmis des éléments permettant de compléter son dossier initial et de consolider sa démonstration.

Ainsi, le rapporteur estime satisfaisante, dans son principe, la démarche développée par Areva NP pour identifier les situations créant des transitoires de chocs thermiques sur les calottes de cuve. Le rapporteur rappelle que le caractère exhaustif de la liste des situations est réévalué à l'occasion des réexamens de sûreté périodiques de chaque réacteur en fonctionnement. Aussi, EDF s'est engagée à vérifier le caractère exhaustif de la liste des situations pour les calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville à l'occasion de la mise à jour des dossiers de référence réglementaires.

Enfin, le rapporteur considère que les nombreux compléments apportés par Areva NP au cours de l'instruction ont permis d'aboutir *in fine* à des chargements thermomécaniques induits par ces situations jugés conservatifs.

6. Analyse du risque de rupture brutale

Les aciers ferritiques ont un comportement purement fragile à très basse température ($T-RT_{NDT}$), un comportement majoritairement ductile aux températures $T-RT_{NDT}$ supérieures à 60 °C et un comportement mixte entre les deux. Il doit être démontré que le risque de rupture du fond et du couvercle de la cuve du réacteur EPR de Flamanville peut être exclu en cas de sollicitation du matériau ségrégué dans ces trois domaines de température.

Les essais de ténacité réalisés dans le cadre du programme d'essais sur les calottes sacrificielles montrent que l'élévation de la teneur en carbone n'affecte pas le comportement à très basse température de l'acier ferritique. La courbe de ténacité indexée sur la RT_{NDT} de recette et celle définie pour les zones avec une teneur en carbone supérieure à 0,25 % apparaissent identiques aux températures $T-RT_{NDT}$ inférieures à -100 °C (Figure 37). Par ailleurs, la température la plus basse pouvant être appliquée aux calottes en fonctionnement étant de 15 °C [70] et la RT_{NDT} maximale en fin de vie étant de 45 °C (paragraphe 4.3.9.1 et Tableau 39), une sollicitation de l'acier des calottes dans son domaine de comportement purement fragile est improbable.

Les essais de ténacité réalisés dans le cadre du programme d'essais montrent également que les zones ségréguées présentent un comportement suffisamment ductile à chaud, la ténacité restant en effet supérieure aux valeurs minimales prescrites par le code RCC-M pour un acier ferritique. Les conclusions du dossier de rupture brutale de conception ne sont donc pas remises en cause pour le domaine de température correspondant.

Pour justifier l'absence de risque de rupture brutale, il s'agit donc essentiellement d'évaluer le risque de rupture dans le domaine de la transition fragile-ductile aux températures $T-RT_{NDT}$ inférieures à 60 °C. Cette évaluation, réalisée par Areva NP, suit la démarche rappelée ci-après, validée par l'ASN après la séance du GP ESPN du 30 septembre 2015 [7].

6.1. Démarche d'évaluation du risque de rupture brutale

Le risque de rupture brutale des calottes est évalué au regard du risque d'amorçage de la rupture à partir d'un défaut potentiellement présent dans les zones les plus contraintes des calottes. Ce risque est considéré comme exclu si la ténacité de l'acier des calottes est suffisante pour empêcher l'amorçage de ce défaut sous l'ensemble des sollicitations subies par la calotte considérée, majorées d'un coefficient de sécurité (α) dépendant de la probabilité d'occurrence de la sollicitation (Tableau 42). Ceci revient à vérifier que le facteur d'intensité de contraintes (K_{CP}) au niveau du défaut reste inférieur à la ténacité (K_{JC}) quelle que soit la sollicitation, ce qui s'écrit :

$$F_m = K_{JC}/(\alpha.K_{CP}) \geq 1 \quad \text{ou} \quad RT_{NDT} \leq RT_{NDT \text{ admissible}}$$

La $RT_{NDT \text{ admissible}}$ est la RT_{NDT} pour laquelle le facteur de marge F_m est égal à 1.

Situations	Classement	Probabilité d'occurrence /année.réacteur	Coefficient de sécurité α
Normales et perturbées	Catégorie 2	$f > 10^{-2}$	2
Incidentelles et épreuves hydrauliques	Catégorie 3	$10^{-4} < f < 10^{-2}$	1,6
Accidentelles	Catégorie 4	$10^{-6} < f < 10^{-4}$	1,2

Tableau 42 : Coefficient de sécurité de l'annexe ZG 3230 du code RCC-M

La ténacité minimale de chacune des calottes supérieure et inférieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville est estimée à partir de la courbe de ténacité de l'annexe ZG 6110 du code RCC-M indexée sur les températures de fin de vie, elles-mêmes définies à partir des résultats du programme d'essais sur les calottes sacrificielles, à savoir :

- une température pénalisante issue des essais de ténacité sur les calottes sacrificielles, dite T_{en} , différente selon qu'elle concerne la peau interne ou externe des calottes sacrificielles, transposée aux calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville et majorée de 15 °C pour tenir compte des phénomènes de vieillissement en service (voir paragraphe 4.1.1.5) ;
- une RT_{NDT} définie à partir de la RT_{NDT} maximale, différente selon qu'elle concerne la peau interne ou externe des calottes sacrificielles, transposée aux calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville et majorée de 15 °C pour tenir compte des phénomènes de vieillissement en service (voir paragraphe 4.1.1.5).

Le calcul de ces températures d'indexation est présenté en détail au paragraphe 4.3.

Les facteurs d'intensité de contraintes ont été établis selon l'approche préconisée dans l'annexe ZG du code RCC-M.

Dans une première étape, les contraintes de pression et les contraintes thermiques sont évaluées dans la structure, en considérant un comportement élastique et en l'absence de défaut. Pour les calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville, ces contraintes ont été déterminées à partir de calculs aux éléments finis avec un modèle tridimensionnel pour la calotte supérieure et avec un modèle bidimensionnel axisymétrique pour la calotte inférieure.

Dans une seconde étape, connaissant les contraintes au niveau du défaut postulé, les facteurs d'intensité de contraintes (K_{CP}) sont calculés à partir de fonctions d'influence disponibles dans des abaques (code RSE-M ou Handbook Tada-Paris [71]) ou développées spécifiquement par Areva NP [18][68][69]. Une correction est ensuite appliquée pour tenir compte du comportement élasto-plastique de la structure, conformément à ce qui est préconisé dans le code RCC-M.

Enfin, du fait de l'augmentation de la T_{NDT} en zone ségréguée, Areva NP a analysé l'opportunité de renforcer le conservatisme des analyses de mécanique pour la 4^e catégorie, conformément à la position exprimée par l'ASN au point 2⁴⁶ de l'annexe 2 de sa lettre en référence [10]. Pour Areva NP, l'augmentation de la T_{NDT} en zone ségréguée ne traduit pas uniquement une dégradation des capacités d'arrêt de fissure puisque cette augmentation est, selon ses propres interprétations des essais, en partie liée au durcissement du matériau. Areva NP considère de ce fait que le conservatisme des analyses de 4^e catégorie est suffisant.

⁴⁶ Position de l'ASN : « Je considère qu'en fonction des valeurs de RT_{NDT} qui seront déterminées en zone ségréguée, le conservatisme des analyses mécaniques pour les situations de quatrième catégorie devra être renforcé. »

6.2. Défauts postulés

Dans les analyses mécaniques, Areva NP postule la présence de défauts qu'il considère comme étant les plus nocifs au regard des chargements présents dans chaque calotte. Pour Areva NP, il s'agit des défauts perpendiculaires à la surface des calottes en raison du champ de contrainte engendré par les chargements de pression et de température (voir Figure 43). Cette orientation de défaut est donc retenue pour l'ensemble des défauts qui ont été postulés dans la structure (Figure 45). La taille des défauts a été définie en cohérence avec les limites de détection des moyens de contrôles par ultrasons (voir partie 3) : 10 mm x 20 mm.

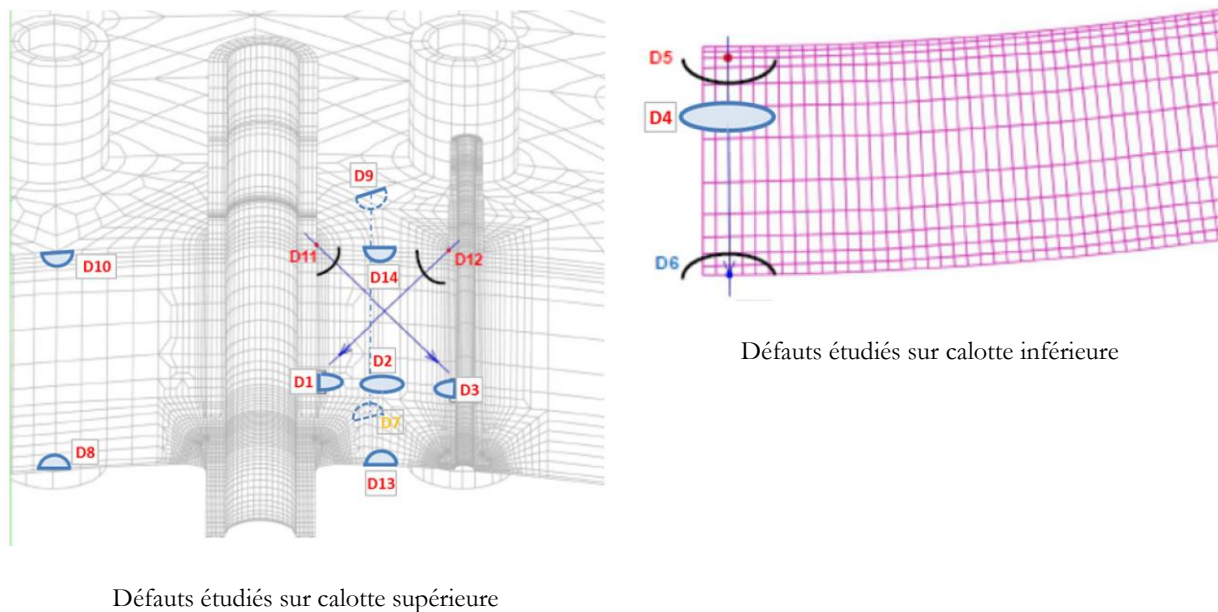


Figure 45 : Localisation des défauts postulés

6.3. Méthodes de calcul du facteur d'intensité de contraintes associé à chaque type de défaut

Le Tableau 43 présente, pour chaque type de défaut postulé isolément dans chaque calotte, la méthode de calcul du facteur d'intensité de contraintes K_{CP} associée, et plus particulièrement les fonctions d'influence utilisées et la correction plastique appliquée.

Type de défaut	Taille a x 2c (mm x mm)	Localisation (défaut)	Détermination des facteurs d'intensité de contrainte	
			Fonctions influence	Correction plastique
Défaut débouchant en peau externe	10 x 60	Zone courante (D6, D9, D10, D14)	Annexe 5.4 du RSE-M (défaut débouchant dans une plaque)	Annexe ZG 5110 du RCC-M
	10 x 20	Coin de perçage (D11, D12)	Développement spécifique d'Areva NP [18][68][69]	
Défaut sous revêtement (DSR)	10 x 60	Zone courante (D5, D7, D8, D13)	Annexe 5.4 du RSE-M (défaut débouchant dans une plaque)	
Défaut enfoui aux trois quarts de l'épaisseur	10 x 60	Zone courante (D2, D4)	Abaque Tada-Paris [71]	
	10 x 30	Coin de perçage (D1, D3)	Développement spécifique Areva NP [18][68][69]	
Défaut débouchant en peau externe	20 x 120	Zone courante (D6, D9, D10, D14)	Annexe 5.4 du RSE-M (défaut débouchant dans une plaque)	
	20 x 120	Coin de perçage (D11, D12)	Développement spécifique Areva NP [18][68][69]	

Tableau 43 : Synthèse des défauts étudiés indépendamment et méthode de calculs des facteurs d'intensité de contraintes associés

6.4. Chargements limitatifs considérés

Les situations de chocs chauds et de chocs froids qui conduisent à l'ouverture d'un défaut localisé, respectivement en peau externe et en peau interne, ont été examinées par Areva NP, ce qui a permis de retenir un certain nombre de situations jugées comme les plus pénalisantes pour chaque catégorie de situations (cf. chapitre 5 et Annexe 12). Celles-ci sont issues des études de sensibilité dont les résultats sont résumés en Annexe 14. *In fine*, la situation la plus pénalisante pour chaque catégorie de situations a été identifiée pour établir les marges minimales pour le risque de rupture brutale des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville. Ces situations sont listées dans les Tableau 44 et Tableau 45.

L'échange thermique entre le fluide et la paroi interne des calottes au cours des transitoires thermiques est supposé parfait (coefficient d'échange thermique infini), sauf pour l'étude du défaut débouchant en peau interne de la calotte inférieure où il est pris comme variable. Les caractéristiques thermiques et thermomécaniques sont issues du code RCC-M.

Chocs chauds	Catégorie 2	Catégorie 3	Catégorie 4
Calotte supérieure	1A1-90	Surpression primaire à froid	Perte RIS-RA en mode RA
	20A345b		
Calotte inférieure	20E-3P	Connexion RIS-RA en mode RA	Reprise de la circulation naturelle après accident de perte de réfrigérant primaire
	20E-1P		

Tableau 44 : Transitoires de type choc chaud les plus pénalisants pour chacune des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville retenus par Areva NP

Chocs froids	Catégorie 2	Catégorie 3	Catégorie 4
Calotte supérieure	20A345b	3.4 (a)	EDG 45 cm ²
Calotte inférieure	20E-3P	3.8-2	Brèche sur le circuit RIS-RA en mode RA

Tableau 45 : Transitoires de type choc froid les plus pénalisants pour chacune des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville retenus par Areva NP

Les épreuves hydrauliques de fin de fabrication avant la première mise en exploitation⁴⁷ et de requalification pendant l'exploitation sont aussi des situations sollicitant les défauts potentiels. C'est pourquoi Areva NP a également étudié le risque d'amorçage à la rupture lors de ces épreuves. Les températures et pressions d'épreuve sont données dans le Tableau 46.

Épreuve hydraulique (EH)	
Fin de fabrication (EH2)	Requalification périodique (EH3 et suivantes)
P=25 MPa T=35 °C	P=21 MPa T=60 °C

Tableau 46 : Pression et température d'épreuve hydraulique

6.5. Marges à la rupture dans le domaine de la transition fragile-ductile

6.5.1. Défaut d'une hauteur de 10 mm

Lors de l'épreuve hydraulique de fin de fabrication réalisée à une température de 35 °C, le risque d'amorçage d'un défaut d'une hauteur de 10 mm apparaît comme exclu selon Areva NP. En effet, le facteur de marge minimal est supérieur à 1, que ce soit pour la calotte inférieure ou la calotte supérieure. Les températures d'indexation en zone ségréguée (T_{env} et RT_{NDT}) restent donc inférieures à la RT_{NDT} admissible, ce qui permet de respecter la demande n° 12 de la lettre de l'ASN en référence [7] (Tableau 47).

⁴⁷ La cuve a déjà été éprouvée en usine et le sera à nouveau en même temps que le circuit primaire principal avant la mise en service.

Température d'indexation transposée début de vie (*)	T _{env} en zone ségréguée	RT _{NDT} en zone ségréguée	RT _{NDT} admissible
Calotte supérieure	-6 °C (F _m = 2,2)	20 °C (F _m = 1,2)	32 °C
Calotte inférieure	4 °C (F _m = 1,8)	30 °C (F _m = 1,1)	36 °C

(*) Température d'indexation établie en considérant les résultats du programme d'essais (T_{env} = -21 °C, RT_{NDT max} = 5 °C) majorée du facteur de transposition propre à chacune des calottes supérieure et inférieure FA3, voir 4.3.9.

Tableau 47 : Marges à la rupture en situation d'épreuve hydraulique de fin de fabrication pour un défaut en peau externe (zone la plus pénalisante) [11] [72]

D'après Areva NP, durant tout le fonctionnement du réacteur, le risque d'amorçage de la rupture s'initiant sur un défaut de 10 mm dans la calotte inférieure ou dans la calotte supérieure peut également être considéré comme exclu. En effet, les calculs menés aboutissent à des facteurs de marge supérieurs à 1, quelle que soit la température d'indexation de la courbe du RCC-M considérée (Tableau 48, Tableau 49). Par conséquent, la RT_{NDT} admissible, toutes catégories de situations confondues, reste supérieure aux températures d'indexation de la courbe du RCC-M, conformément à la demande n° 12 de la lettre de l'ASN en référence [7] (Tableau 48, Tableau 49).

Pour Areva NP, le risque de rupture lors des épreuves hydrauliques de requalification périodique à une température de 60 °C est aussi exclu. Le facteur de marge minimal est de 1,8 pour la calotte supérieure et de 1,5 pour la calotte inférieure. Il est défini en tenant compte de la ténacité minimale obtenue à l'issue du programme d'essais (Tableau 48, Tableau 49).

Enfin, les calculs d'Areva NP montrent que tout défaut enfoui aux trois quarts de l'épaisseur présente des marges en regard du risque d'amorçage de la rupture, plus élevées que celles d'un défaut en peau interne sous le revêtement de même dimension. Ces marges sont présentées dans le Tableau 48 et le Tableau 49.

		Facteurs de marge minimaux pour un défaut de 10 mm				
Localisation du défaut	Température d'indexation transposée fin de vie (voir 4.3.9)		Catégorie 2	Catégorie 3	Catégorie 4	Épreuve hydraulique en exploitation
Peau externe	RT _{NDT} conception ⁴⁸	-5 °C	4,7	4,7	3,6	> 3,5
	T _{env} (ZS) ⁴⁹	9 °C	3,6	3,6	2,6	3,5
	RT _{NDT} (ZS) ⁵⁰	35 °C	2,5	2,7	1,6	1,8
	RT _{NDT} admissible	74 °C	-	-	1,0	-
Peau interne	RT _{NDT} conception ⁴⁸	-5 °C	3,5	4,3	4,0	> 4,6
	T _{env} (ZS) ⁵¹	< -5 °C	> 3,5	> 4,3	> 4,0	> 4,6
	RT _{NDT} (ZS) ⁵²	20 °C	>2,0	>1,8	>1,5	> 2,7
	RT _{NDT} admissible	49 °C	-	-	1,0	-

Tableau 48 : Calotte supérieure - Facteurs de marge F_m minimaux et RT_{NDT} admissibles en peau externe et en peau interne [11] [72]

		Facteurs de marge minimaux pour un défaut de 10 mm				
Localisation du défaut	Température d'indexation transposée fin de vie (voir 4.3.9)		Catégorie 2	Catégorie 3	Catégorie 4	Épreuve hydraulique en exploitation
Peau externe	RT _{NDT} conception ⁴⁸	-5 °C	5,8	2,3	2,9	> 3,5
	T _{env} (ZS) ⁴⁹	19 °C	3,9	1,5	1,8	2,8
	RT _{NDT} (ZS) ⁵⁰	45 °C	3,0	1,1	1,2	1,5
	RT _{NDT} admissible	60 °C	-	1,0	-	-
Peau interne	RT _{NDT} conception ⁴⁸	-5 °C	4,2	3,2	3,6	> 3,2
	T _{env} (ZS) ⁵¹	<-5 °C	> 4,2	> 3,2	> 3,6	> 3,2
	RT _{NDT} (ZS) ⁵²	30 °C	2,1	1,6	1,6	2,0
	RT _{NDT} admissible	57 °C	-	-	1,0	-

Tableau 49 : Calotte inférieure - Facteurs de marge F_m minimaux et RT_{NDT} admissibles en peau externe et en peau interne [11] [72]

⁴⁸ RT_{NDT} retenue dans le dossier de conception initial (avant la détection de l'anomalie)

⁴⁹ T_{env} en peau externe transposée fin de vie
= T_{env} (-21°C) + facteur de transposition (+15°C pour la calotte supérieure, +25°C pour la calotte inférieure) + ΔRT_{NDT} vieillissement (+15°C)

⁵⁰ RT_{NDT} en peau externe transposée fin de vie
= RT_{NDT} en zone ségréguée des calottes UK et UA (+5°C) + facteur de transposition (+15°C pour la calotte supérieure, +25°C pour la calotte inférieure) + ΔRT_{NDT} vieillissement (+15°C)

⁵¹ T_{env} maximale en peau interne transposée fin de vie
= T_{env} maximale aux trois quarts des calottes UA (-62°C) + facteur de transposition (+15°C pour la calotte supérieure, +25°C pour la calotte inférieure) + ΔRT_{NDT} vieillissement (+15°C)

⁵² RT_{NDT} maximale en peau interne transposée fin de vie
= RT_{NDT} maximale aux trois quarts de l'épaisseur des calottes UA (-10°C) + facteur de transposition (+15°C pour la calotte supérieure, +25°C pour la calotte inférieure) + ΔRT_{NDT} vieillissement (+15°C)

6.5.2. Marges pour un défaut conventionnel d'une hauteur de 20 mm

En complément de l'analyse de nocivité d'un défaut en limite de détection (défaut d'une hauteur de 10 mm), Areva NP a étudié le risque d'amorçage de la rupture à partir d'un défaut conventionnel d'une hauteur de 20 mm et d'une longueur de 120 mm, positionné en peau externe. Cette étude de sensibilité à la taille du défaut a pour but de démontrer la robustesse des calottes au grand défaut. Les facteurs de marge pour ce défaut apparaissent supérieurs à 1 en toutes catégories de situation, y compris en épreuve hydraulique de fin de fabrication à une température de 35 °C (Tableau 50), en considérant la température permettant de couvrir les valeurs de ténacité.

Facteurs de marge minimaux pour un défaut débouchant en peau externe de 20 mm				
Température d'indexation $T_{env} = 19\text{ °C}$	Catégorie 2	Catégorie 3	Catégorie 4	Épreuve hydraulique de fin de fabrication
Calotte supérieure	1,9	2,4	1,5	1,3
Calotte inférieure	2,4	1,1	1,3	1,2

Tableau 50 : Marge à la rupture pour un défaut de 20 mm en peaux externes des calottes de cuve FA3 [11]

6.6. Position du rapporteur sur l'analyse de risque de rupture brutale

6.6.1. Démarche

Le rapporteur note que l'évaluation du risque de rupture brutale est cohérente avec la démarche prescrite par le code RCC-M, tant par le choix des défauts analysés que par la définition de la ténacité minimale et l'évaluation des facteurs d'intensité de contraintes.

Le rapporteur note qu'en réponse au point 2⁵³ de l'annexe 2 de la lettre de l'ASN en référence [10], Areva NP ne juge pas nécessaire d'augmenter le conservatisme des analyses de mécanique en 4^e catégorie de situations.

Le rapporteur note qu'Areva NP vérifie bien que les facteurs de marge à la rupture sont supérieurs à 1, en considérant la courbe du RCC-M indexée sur la RT_{NDT} effectivement mesurée en zone ségréguée au moyen des essais Pellini (voir ci-après). **Compte tenu du conservatisme de cette indexation, satisfaisant, le rapporteur considère que l'absence de renforcement du conservatisme en 4^e catégorie est acceptable.**

⁵³ Demande n° 2 : « En fonction des valeurs de RT_{NDT} qui seront déterminées en zone ségréguée, je vous demande de prendre position sur la nécessité de renforcer le conservatisme des analyses mécaniques, pris en compte dans le dossier actuellement proposé, afin de couvrir les incertitudes. »

6.6.2. Ténacité

Le rapporteur note que l'estimation de la ténacité en zone ségréguée repose sur les résultats du programme d'essais, et plus précisément sur des températures d'indexation de la courbe du RCC-M définies de manière conservatrice. Cette approche est jugée satisfaisante par le rapporteur (voir paragraphe 4.3.9.2).

6.6.3. Méthode de calcul du facteur d'intensité de contraintes

Le rapporteur n'a pas de réserve particulière quant à l'emploi des fonctions d'influence définies dans le code RSE-M et quant à la correction plastique appliquée pour l'étude d'un défaut débouchant en peau externe et en zone courante des calottes supérieure et inférieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville.

Pour l'étude des défauts situés en coin de perçage et en peau externe de la calotte supérieure, le rapporteur note qu'Areva NP a développé des fonctions d'influence spécifiques qui ont été validées en interne par Areva NP, et ont fait l'objet d'une publication dans une revue scientifique internationale à comité de lecture. Pour le rapporteur, la méthode de développement de ces fonctions d'influence est cohérente avec l'approche classique et n'appelle pas de remarque.

Toutefois, le rapporteur note que les méthodes citées précédemment n'ont pas été développées spécifiquement pour l'étude des défauts sous revêtement (DSR) et qu'elles peuvent, pour certains chargements, être moins pénalisantes que la méthode dédiée à l'étude des DSR également disponible dans le code RSE-M. Ceci est principalement lié à la correction de plasticité appliquée, qui diffère de celle prescrite par le code RCC-M.

Le rapporteur a demandé à Areva NP d'évaluer les facteurs de marge des défauts sous revêtement avec la méthode spécifique à l'étude de tels défauts codifiée dans le code RSE-M. Areva NP a donc réalisé cette évaluation pour les transitoires les plus pénalisants ; les résultats ne remettent pas en cause les conclusions établies [86] ce qui n'appelle pas de remarque de la part du rapporteur.

6.6.4. Taille de défaut

Le rapporteur note qu'aucun défaut du type d'une fissure non conforme aux spécifications techniques n'a été détecté dans les calottes supérieure et inférieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville lors des contrôles de fabrication (cf. chapitre 3). Le défaut considéré dans les analyses de mécanique est un défaut hypothétique, de taille supérieure au plus grand défaut détectable par les contrôles par ultrasons. Le rapporteur estime que la taille et l'orientation des défauts postulés isolément sont conservatrices. À taille de défaut identique, tout défaut non-perpendiculaire à la peau est moins pénalisant que le défaut perpendiculaire du fait du mode de sollicitation. Les défauts parallèles ou quasi-parallèles aux peaux étant peu sollicités, la tolérance à ces défauts est meilleure.

La taille et l'orientation des défauts postulés dans les analyses à la rupture brutale n'appellent pas de remarque de la part du rapporteur par rapport aux conclusions de l'analyse des performances des contrôles non destructifs présentée au chapitre 3 du présent rapport.

6.6.5. Chargements retenus

En ce qui concerne les situations de choc thermique sollicitant un défaut hypothétique en peau interne ou en peau externe des calottes, le rapporteur note, d'une part que les situations les plus pénalisantes ont bien été retenues dans les analyses mécaniques pour chaque catégorie de situation, d'autre part que les transitoires de pression et de température induits par ces situations ont été définis de manière conservative (voir chapitre 5).

Par ailleurs, à la demande du rapporteur, Areva NP a justifié dans la note en référence [73] que les efforts exercés par contact entre le tube d'adaptateur et le couvercle introduisent des contraintes négligeables comparativement à celles induites par les transitoires de pression et de température. La justification apportée n'appelle pas de remarque du rapporteur.

6.6.6. Marges à la rupture

Le rapporteur retient que, d'après les calculs d'Areva NP, la ténacité en zone ségréguée est suffisante pour assurer la résistance mécanique des calottes supérieure et inférieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville en toutes catégories de situation et lors des épreuves hydrauliques. Les marges à l'égard du risque de rupture sont diminuées par rapport à celles calculées avec les propriétés d'un matériau non ségrégué, mais demeurent supérieures à 1. La RT_{NDT} en zone ségréguée et a fortiori la température d'indexation optimale en zone ségréguée sont inférieures à la RT_{NDT} admissible, ce qui répond à la demande n° 12⁵⁴ de la lettre de position en référence [7].

Le rapporteur a mené ses propres analyses de manière à vérifier les calculs d'Areva NP.

Le rapporteur considère que le risque de rupture amorcée à partir d'un défaut présent dans les calottes de cuve du réacteur EPR de Flamanville peut être considéré comme exclu au vu des marges déterminées par Areva NP.

⁵⁴ Demande n° 12 de la lettre de l'ASN en référence [7] : « L'ASN vous demande de vérifier que les températures d'indexation déterminées par le programme d'essais sont inférieures à la température d'indexation maximale admissible qui résulte des analyses de mécanique à la rupture ».

7. Impact des irrégularités détectées au sein de l'usine Creusot Forge d'Areva NP sur le traitement de l'anomalie des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville

7.1. Détection des écarts

La détection de plusieurs anomalies techniques dans l'usine Creusot Forge d'Areva NP depuis 2012, dont celles affectant les calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville, a conduit l'ASN en avril 2015 à demander à Areva NP et EDF de tirer l'ensemble du retour d'expérience de ces événements.

L'ASN a en particulier incité Areva NP à lancer une revue de la qualité des pièces fabriquées par le passé dans son usine Creusot Forge qui a élaboré les deux calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville et les trois calottes sacrificielles. Cette revue menée par un organisme extérieur indépendant, au final peu approfondie, et qui ne remontait que jusqu'en 2010, a été considérée insuffisante par l'ASN car elle ne permettait pas d'obtenir un jugement d'ensemble de l'organisation et des pratiques de l'usine Creusot Forge, de la qualité des pièces produites et de la culture de sûreté de l'établissement.

Areva NP a donc lancé début 2016 de nouvelles actions de revue qui ont conduit à détecter des irrégularités dans des documents internes de l'usine Creusot Forge marqués d'un signe, la plupart du temps une double barre. Certaines informations contenues dans ces dossiers dits « barrés » révèlent des écarts aux exigences applicables ou des incohérences avec le contenu des dossiers de fin de fabrication présentés aux clients et aux autorités de sûreté.

À partir de l'été 2016, des investigations menées sur des dossiers non marqués d'un signe spécifique ont permis de détecter de nouveaux écarts qui n'avaient pas non plus été communiqués aux clients et aux autorités de sûreté. Areva NP a alors décidé de lancer un examen complet de l'ensemble de la documentation disponible pour toutes les pièces fabriquées par le passé par Creusot Forge.

Areva NP a mis en œuvre une organisation dédiée pour réaliser cet examen complet. Un pôle d'inspection est chargé de relire et examiner l'ensemble des documents présents dans les archives relatives aux pièces réalisées. Ces archives sont constituées des rapports de fin de fabrication et de documents internes (historique de forge, commande du lingot à l'aciérie, procès-verbaux d'essais originaux, courbes de traitement thermique, etc.). La relecture des documents se fait à partir d'un guide qui précise plus d'une centaine de points à examiner, notamment :

- la vérification du respect de la réglementation et du code de fabrication applicables lors de l'élaboration des composants ;
- la vérification de la bonne retranscription des valeurs entre les procès-verbaux présents dans les dossiers internes et ceux du rapport de fin de fabrication ;
- la recherche d'incohérences entre les résultats présents dans les divers documents ;
- la recherche d'éventuelles opérations complémentaires non tracées dans le rapport de fin de fabrication.

À la suite de cette relecture, le pôle d'inspection formule un constat dès qu'un élément est suspect, puis un pôle technique piloté par l'ingénierie d'Areva NP caractérise les constats qui sont ensuite examinés par un comité technique composé d'experts d'Areva NP et EDF. En fonction des conclusions de cet examen, les constats sont classés sans écart ou conduisent à établir des fiches de non-conformité (écarts aux prescriptions internes de Creusot Forge) ou des fiches d'anomalie (écarts à la réglementation, au code RCC-M ou aux exigences du client). Les différentes fiches font enfin l'objet d'un traitement piloté par le pôle qualité et sont transmises à l'ASN.

Il est important de noter que l'anomalie de la composition en carbone de l'acier des calottes de la cuve de l'EPR de Flamanville n'est pas la conséquence d'un écart dissimulé mais d'une mauvaise appréciation technique.

7.2. Écarts détectés

La revue des dossiers a conduit Areva NP à détecter quatre écarts qui concernent les deux calottes de cuve du réacteur EPR de Flamanville et les trois calottes sacrificielles traitées dans le présent rapport :

- la mesure du taux d'hydrogène était défailante lors de la coulée de la calotte inférieure de Flamanville ;
- le réactif utilisé lors des analyses micrographiques n'était pas adapté pour la mesure de la taille des grains d'austénite primaire pour les cinq calottes ;
- un dossier barré comportant un procès-verbal d'essais mécaniques présentant des valeurs de résilience à -20 °C (52 J, 96 J, 32 J avec la mention « essais officieux ») est présent dans les archives de Creusot Forge pour la calotte supérieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville. Ces valeurs sont différentes de celles reportées sur le procès-verbal du rapport de fin de fabrication (102 J, 96 J, 92 J). Toutefois, les valeurs individuelles sur le dossier barré sont conformes aux requis spécifiés dans le code RCC-M (valeur individuelle minimale de 28 J, valeur moyenne minimale de 40 J) ;
- l'usine Creusot Forge réalisait dans certains cas un préchauffage lors de la dépose des cordons de soudure des éprouvettes destinées aux essais Pellini, ce qui pourrait impacter la valeur des T_{NDT} .

Areva NP a traité chacun de ces écarts et a conclu qu'ils n'ont pas d'impact sur la conformité des pièces et leur représentativité.

Par ailleurs, Areva NP a détecté en 2015 des écarts dans la réalisation d'essais de traction dans les zones de recette. À la demande du rapporteur, Areva NP a réalisé à nouveau :

- les essais concernés des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville ;
- un essai à température ambiante et à 350 °C pour chacune des trois calottes sacrificielles.

Ces essais ont été réalisés sous la surveillance d'un organisme mandaté par l'ASN.

Les résultats de ces nouveaux essais sont conformes aux critères du code RCC-M. Areva NP en conclut que les écarts dans la réalisation des essais de traction n'ont pas d'impact sur la conformité des pièces et leur représentativité. Les rapports de fin de fabrication seront mis à jour avec les nouvelles valeurs.

7.3. Position du rapporteur

L'ASN s'est assurée, en analysant les guides méthodologiques rédigés par Areva NP, que la méthode d'examen des dossiers de fabrication est adaptée, c'est-à-dire qu'elle permet d'obtenir *a posteriori* des garanties du respect des exigences applicables lors de la fabrication de chacune des pièces. Par ailleurs, l'ASN a vérifié par des inspections que cette méthode est bien appliquée.

L'ASN a réalisé en particulier une inspection dans le but d'examiner les conditions de revue par Areva NP des dossiers de fabrication des deux calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville et des trois calottes sacrificielles, et d'identifier si ces dossiers comportent des éléments pouvant remettre en cause les fondements retenus dans le dossier faisant l'objet du présent rapport. Au cours de cette inspection, l'ASN a également vérifié les constats classés sans écart par Areva NP (lettre de suite de l'inspection de l'ASN en référence [29]).

À la suite de ces inspections et de l'analyse du traitement des constats établis lors des revues d'Areva NP, le rapporteur considère que la méthode de relecture des dossiers, entreprise par Areva NP, est adaptée à l'objectif d'apporter des garanties sur le respect des exigences applicables lors de la fabrication des pièces.

Cependant le rapporteur note que la méthode comporte une limite liée au nombre de documents que les inspecteurs d'Areva NP doivent examiner et ne permettra pas d'avoir une garantie totale sur le fait qu'aucun constat ne peut échapper à cette relecture.

Indépendamment de l'examen des dossiers, en partant du principe que la qualité d'une pièce peut être vérifiée en contrôlant sa santé interne et en vérifiant ses propriétés mécaniques, le rapporteur a cherché à identifier les zones d'incertitudes résiduelles.

Le rapporteur constate en particulier que de nombreux essais mécaniques ont été réalisés à nouveau après 2016 et que ces essais ont été surveillés par un organisme mandaté par l'ASN. Des contrôles surfaciques ont également été réalisés après 2016, comme le contrôle par thermographie, le contrôle par ultrasons de recherche de défauts sous revêtement⁵⁵ et le contrôle par ressuage longue durée sur le fond de la cuve du réacteur EPR de Flamanville. Enfin, certains essais mécaniques réalisés avant 2016 l'ont été dans des laboratoires extérieurs au groupe Areva NP. Le rapporteur considère que ces essais et contrôles apportent des garanties sur la qualité des pièces concernées.

A contrario, certains essais de traction et les essais Pellini dans les zones de recette des calottes ont été réalisés avant 2016 dans le laboratoire de l'usine Creusot Forge, parfois avec des procédures inappropriées. Par ailleurs, sur les calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville, certains contrôles par essais non destructifs volumiques ont été réalisés avant 2016. Le rapporteur a considéré que la réalisation à nouveau de ces essais et contrôles permettrait d'obtenir des garanties complémentaires sur la qualité des pièces concernées et sur l'absence d'écart pouvant remettre en cause la représentativité des calottes entre elles. Elle permettrait également de consolider le traitement qu'a fait Areva NP de chacun des écarts identifiés.

À la demande du rapporteur, Areva NP a réalisé à nouveau :

- les essais de traction dans les zones de recette des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville réalisés avant 2016 dans le laboratoire de Creusot Forge ;

⁵⁵ Le contrôle par ultrasons de recherche de défauts sous revêtement sur le couvercle de la cuve du réacteur EPR de Flamanville a été réalisé à l'usine Areva NP de Saint-Marcel et suivi par un organisme mandaté par l'ASN.

- un essai à température ambiante et à 350 °C pour chacune des trois calottes sacrificielles sur des éprouvettes ayant subi les traitements thermiques de qualité et de détensionnement ;
- les essais Pellini dans les zones de recette des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville et des trois calottes sacrificielles réalisés avant 2016 dans le laboratoire de Creusot Forge ;
- les contrôles volumiques par essais non destructifs de fabrication sur le fond de la cuve du réacteur EPR de Flamanville. Le même contrôle n'est plus réalisable aujourd'hui sur le couvercle du fait du manque d'accessibilité.

Ces essais ont été réalisés sous la surveillance d'organismes mandatés par l'ASN.

Les résultats de ces nouveaux essais et contrôles sont conformes aux critères du code RCC-M. Par conséquent, le rapporteur considère qu'ils apportent des garanties complémentaires sur la qualité des pièces concernées et sur l'absence d'écart pouvant remettre en cause la représentativité des calottes entre elles.

Par ailleurs, le rapporteur note que les valeurs de propriétés mécaniques déterminées lors de ces essais ne remettent pas en cause ses conclusions à propos de la résistance mécanique des calottes.

8. Suivi en service

8.1. Dossier d'Areva NP

8.1.1. Rappel des demandes de l'ASN

Dans son avis en référence [6] rédigé à la suite de sa séance du 30 septembre 2015, le GP ESPN a rappelé sa position sur les mesures d'exploitation et de suivi en service :

« Le Groupe permanent note que la démarche de justification qu'Areva NP propose est une analyse du comportement mécanique à la rupture brutale des calottes du fond et du couvercle de la cuve de Flamanville 3, fondée sur des essais menés sur deux pièces sacrificielles représentatives. Cette démarche pourrait mettre en évidence que le procédé de fabrication confère au matériau des propriétés mécaniques d'un niveau suffisant pour prévenir les risques redoutés.

Toutefois, le Groupe permanent considère que cela ne permettra pas de restaurer la garantie sur le premier niveau de défense en profondeur qu'aurait apportée une qualification technique conforme aux standards actuels.

Le Groupe permanent considère en conséquence, en cohérence avec son avis de 2011, que le dossier doit s'accompagner de propositions de mesures d'exploitation ou de suivi en service adaptées à la situation rencontrée et les reporter, le cas échéant, dans la notice d'instruction de l'équipement. Il souhaite les examiner à la lumière des résultats des essais qui seront réalisés. »

À la suite de cet avis, l'ASN a formulé, par la lettre en référence [7], la demande suivante à Areva NP : *« L'ASN vous demande de proposer des mesures renforcées de contrôle de mise en service, d'exploitation et de suivi en service adaptées à la situation rencontrée et les reporter dans la notice d'instruction. »*

8.1.2. Position d'Areva NP

Areva NP considère que l'analyse des conditions de fabrication, des résultats des contrôles par essais non destructifs réalisés au cours des opérations de fabrication et des résultats des contrôles par essais non destructifs complémentaires décrits au chapitre 3 du présent rapport, permettent d'exclure la présence, en fin de fabrication, de défauts nocifs pour le risque de rupture brutale.

Par ailleurs, Areva NP considère que :

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

À partir de ces considérations, Areva NP considère qu'il n'y a pas de défaut connu à ce jour pouvant se propager dans les zones ségréguées et qu'un suivi en service n'est pas nécessaire. Areva NP ne prévoit donc pas de contrôle en service pour les calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville.

Toutefois, pour répondre aux demandes du rapporteur formulées lors de l'instruction, Areva NP a examiné, dans le document en référence [14], la faisabilité de la mise en œuvre de techniques d'inspection en service et les requis associés, sans envisager que l'exploitant doive les mettre en œuvre.

L'étude de faisabilité retient comme zone à inspecter la partie externe des calottes sur une surface d'un diamètre de 1600 mm (incluant de façon conservatrice la zone de ségrégation majeure positive) sur une profondeur comprise entre la surface externe et le quart de l'épaisseur.

Areva NP a analysé les possibilités de contrôle en service pour détecter un défaut d'une hauteur de 10 mm et d'une longueur de 30 mm, compte tenu, d'une part des performances des méthodes de contrôle mises en œuvre en fabrication qui détectent un défaut rugueux de 10 mm par 20 mm, d'autre part du défaut pris en compte dans les calculs de rupture brutale de 10 mm par 60 mm.

8.1.2.1. Contrôlabilité de la calotte inférieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville

Areva NP a examiné les possibilités de contrôle à partir des outils et procédures disponibles pour le contrôle en service du fond de la cuve.

Areva NP considère que ces contrôles sont possibles, moyennant des adaptations de l'outil dédié au contrôle de la soudure du fond de cuve de la machine d'inspection en service (MIS) développée par la société Intercontrôle (ultrasons focalisés en immersion) et le développement des traducteurs de la platine. Areva NP n'exclut toutefois pas des limites à la performance de ce contrôle (zone couverte et taille de défaut).

L'étude de faisabilité menée par Areva NP conclut que :

- la zone ciblée par la MIS pour cet examen (en mode expertise au sens de l'arrêté en référence [2]) serait un volume qui s'étend en profondeur sur 20 mm depuis la paroi externe du fond de cuve et sur une surface couvrant le centre du forgé sur un diamètre de 1600 mm ;
- le défaut recherché serait plan, de longueur supérieure à 30 mm et de hauteur supérieure à 10 mm, perpendiculaire à la paroi, d'orientation radiale (voir Figure 46) débouchant en paroi externe ou avec un ligament maximal de 10 mm, entièrement inclus dans la zone d'examen ;
- une zone d'examen de 36 mm (i.e. jusqu'au quart de l'épaisseur) ne permet plus d'avoir les mêmes performances et cette option implique une baisse importante du seuil de détection et la notation d'un nombre important de parasites.

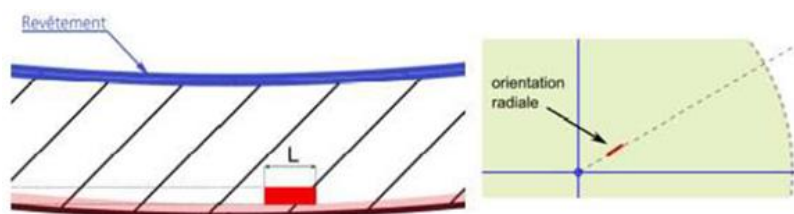


Figure 46 : Défaut d'orientation radiale

Par ailleurs, Areva NP a indiqué, à la suite de demandes de précision de la part du rapporteur, que le développement de la MIS est estimé à 3,5 mois sans compter la phase de qualification du contrôle.

8.1.2.2. Contrôlabilité de la calotte supérieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville

L'étude de faisabilité d'Areva NP retient, pour des raisons d'accessibilité de la zone à contrôler, un examen par un procédé par ultrasons par multiéléments au contact, à partir de l'intérieur du couvercle.

Areva NP a modélisé numériquement la mise en œuvre de cet examen pour les deux défauts représentés sur la Figure 47. À partir de cette simulation, Areva NP estime que la couverture de la zone à examiner serait :

- de l'ordre de 50 % pour la recherche des défauts en coin d'adaptateurs d'orientation radiale par rapport au centre de l'adaptateur, et en azimuth orienté selon le ligament le plus court (Figure 47, cas A) ;
- de l'ordre de 85 % pour des défauts en partie courante orientés selon le ligament le plus court entre adaptateurs et perpendiculaires à la peau externe (Figure 47 cas B).



Figure 47 : Défauts simulés pour le contrôle par ultrasons

Areva NP ne précise pas les performances de ces contrôles et indique que, du fait de la géométrie et de la présence des adaptateurs, l'ensemble du couvercle n'est pas contrôlable en service.

8.2. Position du rapporteur

8.2.1. Principe de défense en profondeur et exclusion de rupture

8.2.1.1. Principe de défense en profondeur

L'article 3.1 de l'arrêté INB en référence [4] impose à l'exploitant de concevoir et d'exploiter son installation nucléaire de base selon le principe de défense en profondeur.

La conception des installations nucléaires doit ainsi conduire à la mise en œuvre de niveaux de défense successifs (caractéristiques intrinsèques, dispositions matérielles et organisationnelles, procédures), destinés à prévenir les incidents et accidents puis, en cas d'échec de la prévention, à en limiter les conséquences. La conception repose essentiellement sur les quatre premiers niveaux de la défense en profondeur⁵⁶ :

- le *premier niveau de défense* a pour objet de prévenir les incidents : pour les équipements, des dispositions sont prises pour assurer un haut niveau de qualité de leur conception et lors 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

⁵⁶ Le cinquième et dernier niveau concerne les plans d'intervention d'urgence.

mettre en œuvre les actions permettant, d'une part d'empêcher que ceux-ci ne conduisent à un accident, 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 revient à vérifier les hypothèses de conception au cours de l'exploitation, en particulier :

- des dispositions d'exploitation permettent d'assurer que l'équipement est utilisé dans le domaine de fonctionnement défini par hypothèse à la conception,
- des dispositions d'entretien et de surveillance 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'état 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.

Ces niveaux de défense doivent être suffisamment indépendants pour que la défaillance d'un niveau ne remette pas en cause l'efficacité des autres niveaux de la défense en profondeur.

8.2.1.2. Exclusion de rupture

La démonstration de sûreté du réacteur EPR de Flamanville repose sur une hypothèse d'exclusion de rupture⁵⁷ des gros équipements du circuit primaire. C'est en particulier le cas pour les calottes de la cuve. En effet, aucune disposition raisonnable de limitation des conséquences de leur rupture, en tant qu'événement déclencheur, ne pourrait être définie.

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, la démarche d'exclusion de rupture nécessite de renforcer les deux premiers niveaux de la défense en profondeur pour atteindre un niveau de sûreté satisfaisant.

Cette démarche doit reposer sur des dispositions particulièrement exigeantes en matière de conception, de fabrication et de suivi en service visant à prévenir la rupture. Ces dispositions concernent :

- l'analyse de l'ensemble des modes d'endommagement, l'utilisation de matériaux présentant une résistance suffisante à ces modes d'endommagement, la détermination des sollicitations auxquelles ils sont soumis, y compris en cas d'agression, et la vérification du respect de critères permettant de prévenir les risques de rupture ;
- le recours à des procédés de fabrication et de contrôle permettant de démontrer l'obtention d'un très haut niveau de qualité tenant compte, conformément au point 4

⁵⁷ La notion « d'exclusion de rupture » utilisée dans le présent rapport correspond à celle de « composant non ruptible » du projet de guide de l'ASN et de l'IRSN intitulé « Recommandations pour la conception des réacteurs à eau sous pression ».

des remarques préliminaires de l'annexe I à la directive en référence [1]⁵⁸, 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 » ;

- le suivi en service, permettant notamment de vérifier en temps utile l'absence de dégradation du composant.

Dans cette perspective, la détermination des sollicitations subies de manière conservative, l'analyse du comportement des structures sous ces sollicitations, l'existence de marges notamment par rapport aux critères mécaniques, la qualification des procédés de fabrication, le choix, l'étendue et la performance des techniques de contrôles au regard des procédés de fabrication, la détermination des critères d'acceptation des défauts de fabrication, l'accessibilité des zones à surveiller en exploitation et l'étendue des contrôles associés, la prise en compte de l'expérience sur le comportement de matériaux ou d'installations similaires sont des moyens nécessaires à la mise en œuvre de cette démarche.

À cet égard, comme l'a rappelé la Section permanente nucléaire⁵⁹ (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 primaire et secondaires principaux du projet EPR, la démonstration d'exclusion de rupture « repose sur les éléments suivants qui sont tous de même importance : conception, vérification de la conception, fabrication, contrôle de la fabrication, suivi en service ». Lors de la même séance, elle indiquait que « la vérification de la conception, le contrôle de la fabrication et le suivi en service doivent être renforcés de manière à rendre improbables l'apparition d'une altération de l'équipement remettant en cause la prévention des différents modes d'endommagement et l'absence de détection à temps de ces altérations ».

8.2.2. Conséquences quant à l'aptitude au service des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville

8.2.2.1. Analyse du premier niveau de défense en profondeur

Non-respect de l'exigence de qualification technique

Le rapporteur note que les processus de qualification technique du procédé de fabrication menés par Areva NP au titre du chapitre M140 du code RCC-M et du point 3.2 de l'annexe I de l'arrêté ESPN en référence [3] n'ont pas permis de maîtriser le risque de présence de ségrégation résiduelle du carbone. Les défaillances des analyses réalisées dans le cadre de ces qualifications techniques ont conduit à la fabrication d'un matériau qui ne satisfait pas au niveau de qualité normalement attendu pour un tel composant.

En outre, elles ont conduit Areva NP à estimer qu'il n'était pas nécessaire de réaliser, lors de la fabrication, les mesures et essais appropriés sur les calottes de la cuve, quand ils étaient encore réalisables, pour vérifier la bonne maîtrise des risques d'hétérogénéité. En effet, une analyse satisfaisante aurait probablement conduit le fabricant à réaliser des filiations de carbone en surface et des essais mécaniques sur des éprouvettes qui auraient pu être prélevées au moment de la réalisation des alésages du couvercle, ce qui aurait permis d'apprécier directement sur la pièce la qualité du matériau.

⁵⁸ Les exigences essentielles de sécurité de l'annexe I à la directive en référence [1] sont rendues applicables par l'arrêté ESPN en référence [3].

⁵⁹ Le GP ESPN a remplacé la SPN à partir de 2010.

Le rapporteur constate ainsi que le haut niveau de qualité de ces composants n'est pas atteint et le déroulement de la qualification technique n'a pas permis de détecter l'anomalie à un stade précoce de la fabrication. Un déroulement correct aurait permis au fabricant de modifier son procédé afin de s'affranchir de l'anomalie.

Meilleure technique disponible

Par ailleurs, le rapporteur note que les calottes de la cuve d'un autre réacteur EPR ont été fabriquées à la même époque que celles du réacteur EPR de Flamanville avec une technique différente. Cette technique permet d'obtenir des composants ne présentant pas à l'état final la même anomalie de composition chimique de l'acier.

Le rapporteur rappelle que l'annexe I de la directive en référence [1] appelée par l'arrêté ESPN en référence [3] exige de 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 ».

Le rapporteur constate qu'Areva NP n'a pas tenu compte de l'état d'avancement de la technique et de la pratique au moment de la conception et de la fabrication et n'a pas utilisé la meilleure technique disponible.

Réduction des marges pour le risque de rupture brutale

Le rapporteur considère que la justification de la résistance mécanique des calottes pour le risque redouté de rupture brutale met en évidence l'existence de marges (voir chapitre 6). Au regard des résultats du programme d'essais, le procédé de fabrication confère ainsi des propriétés mécaniques au matériau d'un niveau suffisant pour prévenir ce risque. Le rapporteur souligne toutefois que **les analyses de résistance mécanique présentées dans le chapitre 6 du présent rapport montrent que la présence d'une zone de ségrégation majeure du carbone réduit sensiblement les marges existantes** par rapport à des calottes exemptes d'anomalie (voir Tableau 49 et Tableau 50).

Bilan du premier niveau de défense en profondeur

Le rapporteur considère que les défaillances constatées sur les processus de qualification technique, l'utilisation d'un procédé de fabrication ne permettant pas de maîtriser les ségrégations résiduelles du carbone et la réduction des marges pour le risque redouté de rupture brutale conduisent à ce que le premier niveau de défense en profondeur est affecté. La démarche de justification d'Areva NP ne permet pas de restaurer seule ce premier niveau de défense en profondeur.

Aussi, dans la mesure où la défaillance des calottes de la cuve n'est pas postulée dans la démonstration de sûreté du réacteur EPR de Flamanville, le rapporteur considère, dans la continuité de son rapport en référence [5], de l'avis du GP ESPN en référence [6] et de la position de l'ASN en référence [7], que **la démarche de justification proposée par Areva NP nécessite d'être complétée par des dispositions permettant de renforcer le deuxième niveau de défense en profondeur.**

8.2.2.2. Renforcement du deuxième niveau de défense en profondeur

Le rapporteur considère, comme Areva NP, que les conditions de fabrication et les résultats des contrôles permettent d'avoir une confiance raisonnable quant à l'absence de défauts inacceptables à l'issue des opérations de fabrication et qu'il n'est pas identifié, avec les connaissances actuelles, de mécanisme de propagation de défaut existant.

Le retour d'expérience a montré l'intérêt de ce deuxième niveau de défense et de son indépendance par rapport au premier. Le rapporteur rappelle ainsi qu'au cours de l'exploitation des réacteurs électronucléaires français, de nombreux cas de mécanismes d'initiation ou de propagation de défaut, non anticipés, ont été détectés, parfois peu de temps après la mise en service. C'est le cas, par exemple, de la corrosion sous contrainte de l'Inconel 600 qui a été constatée sur les adaptateurs de couvercle de cuve, les piquages d'instrumentation des pressuriseurs et les pénétrations de fond de cuve, de la décohésion intergranulaire des liaisons bimétalliques et de la fatigue thermique en zones de mélange. Dans tous ces cas, les anomalies ont été détectées par des contrôles en service ou par la détection de fuites en service ou lors des épreuves hydrauliques de requalification. Ces contrôles et ces épreuves participent au deuxième niveau de défense en profondeur.

Le rapporteur rappelle que le réacteur EPR de Flamanville a été conçu pour une durée de fonctionnement de 60 ans et considère nécessaire de renforcer le deuxième niveau de défense en profondeur en vérifiant périodiquement l'absence de défaut nocif. L'absence de tels défauts est un élément fondamental de la justification de la résistance mécanique des calottes de la cuve.

À la demande du rapporteur, Areva NP a examiné la faisabilité de contrôles par essais non destructifs pendant les arrêts pour maintenance du réacteur, et EDF a pris, à la fin de l'instruction, l'engagement, dans les notes en références [78] et [81], de réaliser les contrôles volumiques en service décrits dans le Tableau 51, qui seront à terme qualifiés au sens de l'arrêté en référence [2]⁶⁰. Une partie des solutions techniques de contrôle, non disponibles à ce jour, fera l'objet d'un appel à candidature international auprès d'industriels et d'universitaires. Ces contrôles par ultrasons sont destinés à rechercher les défauts perpendiculaires à la peau d'orientation radiale et circonférentielle. EDF a retenu pour le fond de cuve la recherche d'un défaut de 10 mm x 30 mm et, pour le couvercle de cuve, un défaut de 10 mm x 10 mm en coin d'adaptateur et de 10 mm x 30 mm en partie courante.

⁶⁰ Tant que les procédés ne seront pas qualifiés, EDF prévoit de les réaliser à des fins d'expertise, au sens de la circulaire de l'arrêté en référence [2], c'est-à-dire qu'ils seront mis en œuvre par des spécialistes dont la compétence a été formellement reconnue et que les conclusions du rapport d'expertise seront approuvées dans un cadre garantissant leur qualité.

Échéances	Calotte du couvercle de cuve			Calotte du fond de cuve		
	Partie externe (20 premiers mm)	Partie interne (20 premiers mm)	Totalité de l'épaisseur	Partie externe (20 premiers mm)	Partie interne (20 premiers mm)	Totalité de l'épaisseur
Visite complète initiale (avant mise en service)	Contrôle manuel non qualifié Étendue limitée ^(a)	Contrôle manuel non qualifié Taux de couverture à estimer	-	Contrôle non qualifié	-	-
Première requalification complète (au plus tard 30 mois après le premier chargement en combustible)	-	-	-	Contrôle qualifié	Contrôle non qualifié	Contrôle non qualifié ^(b)
Première requalification complète + 2 ans	Contrôle automatisé non qualifié Étendue limitée ^(a)	Contrôle automatisé non qualifié	-	-	Qualification du procédé	Qualification du procédé ^(b)
À chaque visite décennale	Contrôle qualifié Étendue limitée ^(a)	Contrôle qualifié ^(b)	Contrôle qualifié ^{(b) (c)}	Contrôle qualifié	Contrôle qualifié	Contrôle qualifié ^(b)

(a) Zone inspectée limitée au ligament le plus court entre adaptateurs :
50 % en coin de tubulure ; 80 % en partie courante (Figure 49, Figure 50)

(b) Étude de faisabilité technique préalable nécessaire

(c) Démarche d'appel international à candidature envisagée par EDF en l'absence de solution technique à ce jour

Tableau 51 : Engagements d'EDF en matière de contrôle en service par essais non destructif volumiques [78] [81]

EDF s'engage à analyser, à la fin de l'année 2025, les conclusions des études de faisabilité technique des nouveaux procédés et de la qualification du procédé de contrôle des vingt premiers millimètres externes du couvercle. En cas de conclusions négatives, EDF s'engage à remplacer le couvercle lors de la première visite décennale.

Fond de la cuve

Le rapporteur considère, en ce qui concerne le fond de la cuve, que les engagements d'EDF présentés dans le Tableau 51 ciblent prioritairement la détection des défauts les plus préjudiciables, ce qui est satisfaisant.

Le rapporteur a interrogé EDF sur la capacité à détecter un défaut légèrement désorienté par rapport aux directions radiales et circonférentielles. EDF estime à ce stade qu'en partie externe, compte tenu du trajet ultrasonore, seuls les défauts désorientés de moins de 3° seraient détectables (voir Figure 48). Le rapporteur note ainsi que les contrôles proposés par EDF permettront de détecter seulement les défauts orientés selon deux faisceaux angulaires de 6°, soit moins de 7 % des orientations possibles des défauts perpendiculaires à la peau externe, ce qui ne permettrait pas de renforcer significativement le deuxième niveau de défense en profondeur.

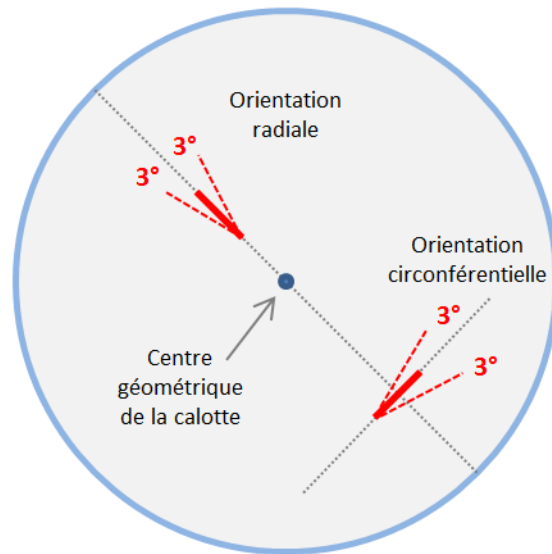


Figure 48 : Orientation des défauts recherchés - vue du dessus de la calotte

Le rapporteur considère que, aucun mode de dégradation n'étant identifié, les contrôles ne peuvent pas être définis en fonction d'une orientation de défaut privilégiée a priori.

Le rapporteur estime qu'il serait possible d'augmenter significativement la couverture du contrôle, par exemple :

- en disposant un nombre supérieur de capteurs sur la platine de la machine d'inspection ;
- ou en réalisant plusieurs passes de contrôle avec les mêmes capteurs et en décalant leur orientation entre chaque passe.

Enfin, le rapporteur note que ces contrôles pourraient être mis en œuvre dès la première requalification complète⁶¹ après la mise en service, ce qui constituerait un contrôle anticipé par rapport à la première visite décennale. Le rapporteur considère que ceci est satisfaisant.

Le rapporteur considère que l'anomalie ne remet pas en cause l'aptitude au service du fond de la cuve sous réserve que les contrôles en service du fond de la cuve soient adaptés de manière à pouvoir détecter l'ensemble des défauts perpendiculaires aux peaux quelle que soit leur orientation. Il estime que les contrôles prévus par EDF, anticipés par rapport à la première visite décennale et auxquels ces adaptations seraient apportées, sont de nature à renforcer significativement le deuxième niveau de défense en profondeur et à compenser la dégradation constatée du premier niveau.

Calotte du couvercle de la cuve

Le rapporteur considère que des contrôles sont indispensables sur le couvercle de la cuve afin de renforcer le deuxième niveau de défense en profondeur et confirmer pendant les 60 années de fonctionnement du réacteur qu'aucun défaut de hauteur supérieure à 10 mm n'est présent dans la

⁶¹ Au plus tard 30 mois après le premier chargement en combustible.

zone ségréguée. Ceci est renforcé par la présence de singularités géométriques liées aux adaptateurs et de conditions d'exploitation différentes de celles du fond (températures, manipulations du couvercle, etc.).

Le rapporteur note que les contrôles sur lesquels s'engage EDF couvrent une zone plus restreinte pour le couvercle que pour le fond de cuve en raison notamment de la zone de recherche limitée aux ligaments les plus courts entre adaptateurs (Figure 49) et d'une impossibilité de détecter tous les défauts à proximité des adaptateurs (couverture de 50 % en coin de tubulure, 80 % en partie courante, voir Figure 50). Le rapporteur note également que, comme pour le fond, seuls les défauts désorientés de moins de 3° par rapport à la direction de recherche seraient détectables. Ces restrictions impliquent que la proportion des défauts perpendiculaires à la peau détectables dans les vingt premiers millimètres externes est très réduite.

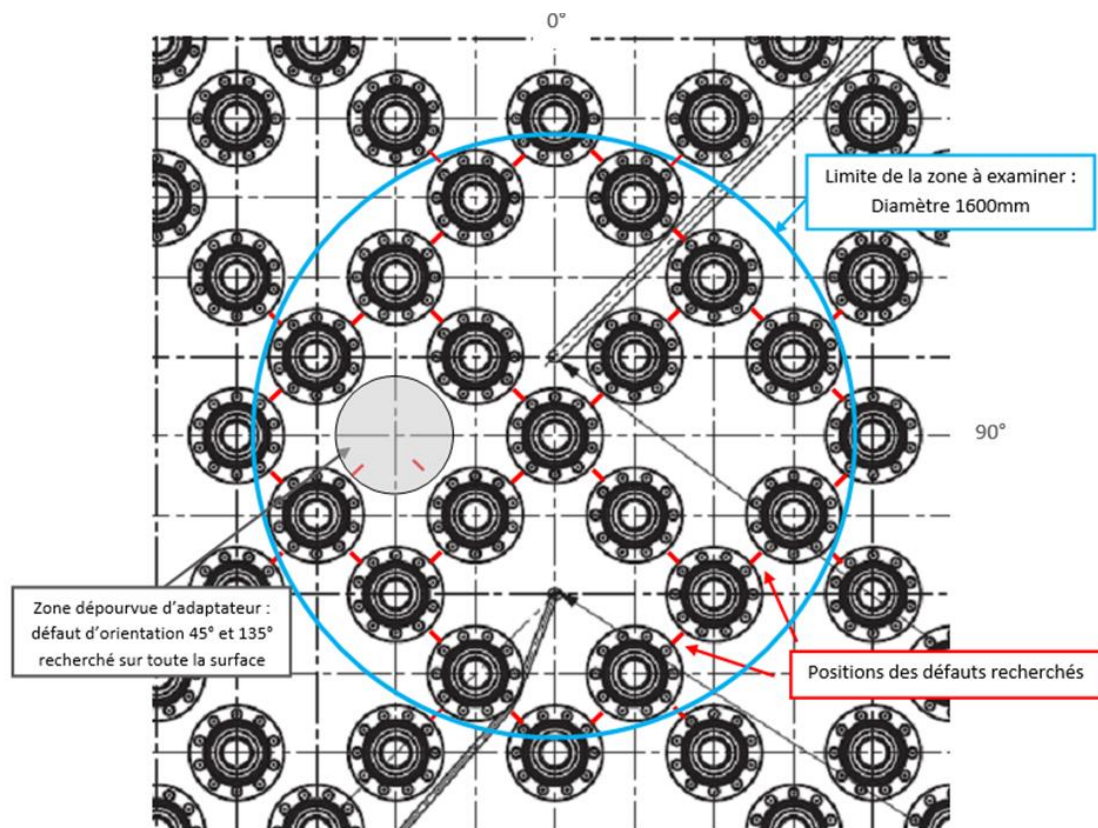


Figure 49 : Partie centrale du couvercle de la cuve du réacteur EPR de Flamanville vue du dessus
– zone à examiner et positions des défauts recherchés

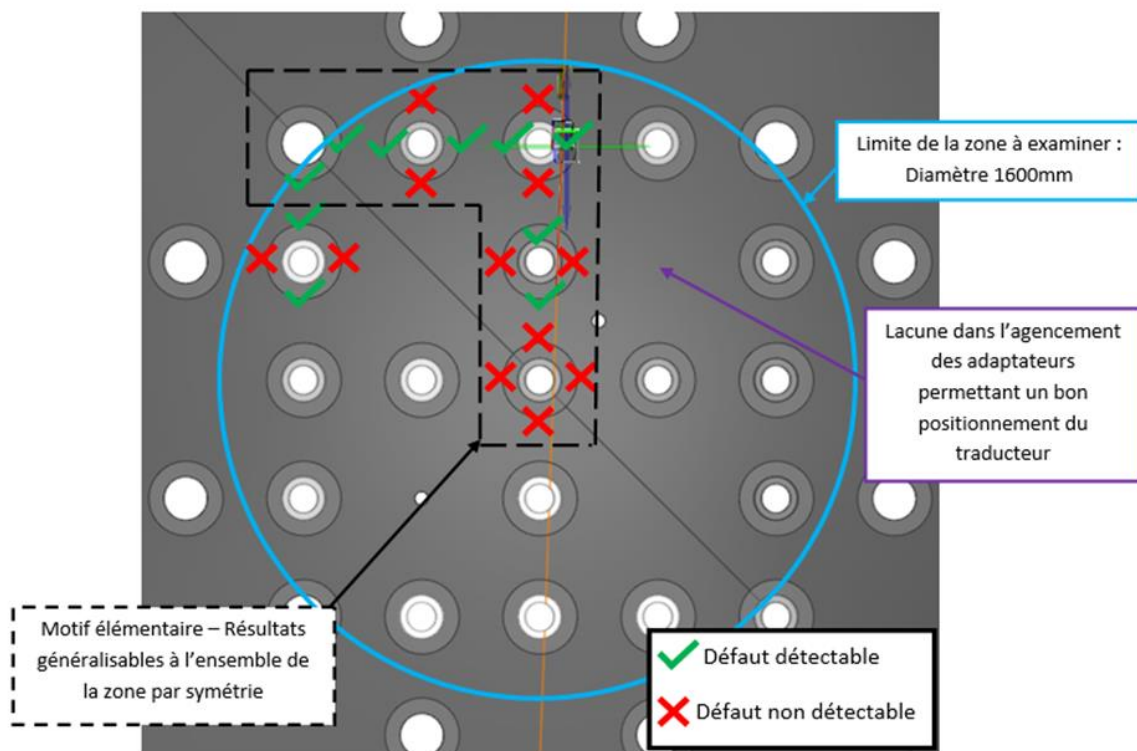


Figure 50 : Partie centrale du couvercle de la cuve du réacteur EPR de Flamanville vue du dessus – possibilité de détecter des défauts à proximité immédiate des adaptateurs

Le rapporteur souligne que le dossier technique transmis par Areva NP et EDF sur les contrôles de suivi en service est très succinct, malgré les échanges tenus avec le rapporteur lors de l’instruction. Il n’apporte aucun élément technique sur la faisabilité des contrôles, leur performance et les conditions d’intervention en termes de radioprotection. Ce dossier ne permet donc pas au rapporteur d’analyser le caractère suffisant des contrôles sur lesquels EDF s’est finalement engagée en fin d’instruction.

Le rapporteur note par ailleurs que de nombreux couvercles de cuve de réacteur ont été remplacés par le passé et qu’Areva NP estime que le délai nécessaire pour remplacer le couvercle de la cuve du réacteur EPR de Flamanville est inférieur à 80 mois (voir Annexe 6). Un nouveau couvercle dont les conditions de fabrication garantiraient l’absence de ségrégations résiduelles du carbone préjudiciables pourrait donc être disponible avant fin 2024 si son approvisionnement était engagé en 2017. Le rapporteur rappelle à ce sujet que l’ASN a demandé à Areva NP dès décembre 2015, dans le courrier en référence [7], d’étudier sans attendre la fabrication d’un nouveau couvercle de cuve en tenant compte du retour d’expérience en matière de conception et de fabrication de l’actuel.

Le rapporteur considère que l’aptitude au service du couvercle actuel de la cuve du réacteur EPR de Flamanville n’est pas acquise de manière pérenne en l’absence de contrôles en service suffisants pour renforcer le deuxième niveau de défense en profondeur. Le rapporteur constate qu’EDF n’est pas en mesure de mettre en œuvre des contrôles en service du couvercle de même portée et aux mêmes échéances que pour le fond de la cuve.

Aussi le rapporteur considère que l'utilisation du couvercle actuel de la cuve du réacteur EPR de Flamanville ne saurait être envisagée au-delà de quelques années de fonctionnement sans que les contrôles en service nécessaires au renforcement du deuxième niveau de défense en profondeur n'aient été mis en œuvre.

9. Conclusion générale

Fin 2014, des essais réalisés dans le cadre de la qualification technique des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville ont mis en évidence la présence d'une zone de ségrégation majeure positive résiduelle du carbone qui a été insuffisamment éliminée pendant les opérations de chutage du lingot. La présence d'un excès de carbone dans cette zone conduit à une diminution de la ténacité du matériau, c'est-à-dire sa capacité à résister à la propagation d'une fissure.

Compte tenu de cet écart, Areva NP a proposé en 2015 une démarche de justification s'appuyant sur une analyse du risque de rupture brutale de ces composants. Cette démarche, qui est relativement classique dans ses principes, vise à justifier que le matériau, en zone ségrégée, est suffisamment tenace pour pouvoir exclure le risque d'amorçage du plus grand défaut potentiellement présent dans chacune des calottes sous l'effet des chargements thermomécaniques qu'elles peuvent subir durant leur fonctionnement.

Areva NP a donc :

- pour déterminer la ténacité du matériau, réalisé un programme d'essais sur trois calottes sacrificielles et justifié leur caractère représentatif par rapport aux calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville ;
- pour déterminer le plus grand défaut potentiellement présent dans chacune des calottes, réalisé des contrôles par essais non destructifs ;
- pour déterminer les chargements thermomécaniques, recensé et caractérisé les transitoires de la chaudière nucléaire susceptibles de solliciter les calottes de la cuve.

Cette démarche a été analysée par le GP ESPN lors de ses séances du 30 septembre 2015 et du 24 juin 2016. Elle a été considérée satisfaisante par l'ASN dans ses lettres en références [7] et [10] sous réserve de la prise en compte de plusieurs demandes auxquelles Areva NP a répondu (voir le tableau en Annexe 15).

Areva NP a mis en œuvre les différentes étapes de cette démarche en 2016 et a transmis à l'ASN le 16 décembre 2016 un dossier justifiant l'aptitude au service des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville. Ce dossier a été instruit par le rapporteur qui en a tiré les conclusions suivantes.

*

Calotte du fond de la cuve du réacteur EPR de Flamanville

Contrôles de fabrication

Au stade de l'approvisionnement de la calotte, Areva NP a contrôlé tout le volume de la pièce dont la zone ségrégée. Les résultats de ces contrôles n'ont pas mis en évidence de défaut de dimensions dépassant les critères des spécifications techniques. Les contrôles complémentaires réalisés à la demande de l'ASN ont également permis de vérifier l'absence de défauts sous revêtement.

Par suite, il a pu être vérifié que la taille des défauts postulés dans les analyses de mécanique d'Areva NP a été définie de manière cohérente avec les performances de ces contrôles.

Caractérisation du matériau

Afin de caractériser le matériau ségrégué, Areva NP a mené un programme d'essais portant sur des calottes sacrificielles, dont le rapporteur souligne l'ampleur. Les différences dans l'élaboration des différentes calottes conduisent à des variations des propriétés mécaniques qui restent limitées mais dont il est difficile d'évaluer avec certitude l'amplitude. Cette observation a amené le rapporteur à considérer que l'appréciation des propriétés du matériau doit se faire selon une démarche dont le conservatisme présente des garanties éprouvées.

Le rapporteur constate que la présence d'une ségrégation résiduelle du carbone est bien à l'origine de la modification des propriétés mécaniques. Le comportement observé reste toutefois celui attendu pour un acier ferritique. La modification des propriétés mécaniques se traduit principalement par une augmentation de la température de transition entre le comportement fragile du matériau et son comportement ductile, de l'ordre d'une dizaine à quelques dizaines de degrés, selon la méthode d'appréciation employée.

Le rapporteur considère qu'il était nécessaire qu'Areva NP apprécie les propriétés du matériau des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville à partir des résultats de son programme d'essais, selon une démarche éprouvée et présentant un conservatisme dont la garantie est indiscutable. En conséquence, le fait qu'Areva NP a retenu une augmentation de la température de transition entre le mode de rupture fragile et le mode ductile égale au décalage maximal de la température de référence à ductilité nulle (RT_{NDT}) entre la zone ségréguée et la zone de recette des calottes testées est satisfaisant.

Enfin, EDF s'est engagée à réaliser un programme d'essais afin de valider les hypothèses prises en compte pour le vieillissement thermique du matériau, ce qui est satisfaisant.

Chargements thermomécaniques

Les transitoires thermohydrauliques examinés par Areva NP pour déterminer les chargements thermomécaniques les plus sévères s'appliquant à la calotte du fond de la cuve, ont été analysés par le rapporteur, en considérant à chaque fois les situations de choc chaud et de choc froid.

Le rapporteur souligne que, à la suite de l'examen approfondi de ce dossier et aux nombreux échanges ayant eu lieu au cours de l'instruction, Areva NP a transmis des éléments permettant de compléter son dossier initial et de consolider sa démonstration.

La démarche adoptée par Areva NP pour identifier les situations à l'origine des sollicitations les plus sévères des calottes de la cuve est au final jugée satisfaisante par le rapporteur, de même que le caractère conservatif des chargements qui ont pu en être déduits.

Analyse mécanique du risque de rupture brutale

L'évaluation du risque de rupture brutale qu'a menée Areva NP est cohérente avec la démarche prescrite par le code RCC-M, tant par le choix des défauts analysés que par la définition de la ténacité minimale et l'évaluation des facteurs d'intensité de contraintes. Les conclusions de cette analyse montrent que les propriétés mécaniques du matériau en zone ségréguée sont suffisantes pour prévenir le risque de rupture brutale.

Irrégularités détectées au sein de l'usine Creusot Forge

Les calottes de cuve ont été fabriquées dans une période pendant laquelle des irrégularités ont été relevées au sein de l'usine Creusot Forge.

À la demande de l'ASN, Areva NP a réalisé à nouveau les essais mécaniques et les contrôles par essais non destructifs réalisés initialement par Creusot Forge sur les différentes calottes. Ces nouveaux essais et contrôles, dont les résultats sont satisfaisants, apportent des garanties complémentaires sur la qualité des pièces concernées et sur l'absence d'écart pouvant remettre en cause la représentativité des calottes entre elles.

Suivi en service

Le rapporteur considère que les défaillances constatées sur les processus de qualification technique, l'utilisation d'un procédé de fabrication ne permettant pas de s'affranchir des risques liés à la ségrégation résiduelle de carbone et la réduction des marges pour le risque redouté de rupture brutale traduisent le fait que le premier niveau de défense en profondeur est affecté. La démarche de justification d'Areva NP ne permet pas de restaurer seule ce premier niveau de défense en profondeur.

Aussi, dans la mesure où la défaillance des calottes de la cuve n'est pas postulée dans la démonstration de sûreté du réacteur EPR de Flamanville, le rapporteur considère que la démarche de justification proposée par Areva NP nécessite d'être complétée par des dispositions de suivi en service des calottes de la cuve.

Le rapporteur considère que l'anomalie ne remet pas en cause l'aptitude au service du fond de la cuve sous réserve que les contrôles du fond de la cuve prévus par EDF soient adaptés de manière à pouvoir détecter l'ensemble des défauts perpendiculaires aux peaux quelle que soit leur orientation. Il estime que ces contrôles, anticipés par rapport à la première visite décennale et auxquels ces adaptations seraient apportées, sont de nature à renforcer significativement le deuxième niveau de défense en profondeur et à compenser la dégradation constatée du premier niveau.

*

Calotte du couvercle de cuve du réacteur EPR de Flamanville

Contrôles de fabrication

Areva NP a réalisé au stade de l'approvisionnement les contrôles volumiques et surfaciques spécifiés par le code RCC-M. Ces contrôles n'ont pas mis en évidence de défaut de dimensions non conformes aux critères des spécifications techniques.

Toutefois, contrairement au fond de cuve, il n'a pas été possible de réaliser des contrôles par essais non destructifs complémentaires en peau externe, afin de détecter des défauts débouchants remplis d'oxyde. Areva NP apporte des éléments justifiant que les procédés de fabrication permettent d'exclure la présence de défauts perpendiculaires à la surface, de dimensions non conformes aux critères des spécifications techniques.

La taille des défauts postulés dans les analyses de mécanique d'Areva NP est cohérente avec les performances de ces contrôles.

Caractérisation du matériau

La caractérisation du matériau de la calotte du couvercle n'a pas mis en évidence de différence notable par rapport à celle du matériau de la calotte du fond.

Chargements thermomécaniques

Les transitoires thermohydrauliques utilisés pour définir les chargements thermomécaniques les plus sévères s'appliquant à la calotte du couvercle de la cuve, selon les différentes catégories de situation, ont été examinés et analysés de la même manière que pour la calotte du fond de cuve.

De même que pour la calotte du fond de cuve, le rapporteur estime que la définition des chargements de la calotte du couvercle n'appelle pas de remarque.

Analyse mécanique du risque de rupture brutale

L'évaluation du risque de rupture brutale qu'a menée Areva NP pour le couvercle de cuve suit une démarche très proche de celle menée pour le fond de cuve.

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

Irrégularités détectées au sein de l'usine Creusot Forge

Comme pour le fond de la cuve, Areva NP a réalisé à nouveau, à la demande de l'ASN, les essais mécaniques et les contrôles par essais non destructifs menés initialement par Creusot Forge sur les différentes calottes. Ces nouveaux essais et contrôles, dont les résultats sont satisfaisants, apportent des garanties complémentaires sur la qualité des pièces concernées et sur l'absence d'écart pouvant remettre en cause la représentativité des calottes entre elles.

Le rapporteur note toutefois, contrairement au fond de cuve, que les contrôles volumiques par essais non destructifs de fabrication n'ont pas pu être réalisés à nouveau du fait de l'encombrement du couvercle.

Suivi en service

Le rapporteur considère que des contrôles du couvercle de la cuve sont indispensables afin de renforcer le deuxième niveau de défense en profondeur et vérifier durant toute la période de fonctionnement du réacteur qu'aucun défaut de hauteur supérieure à 10 mm n'est présent dans la zone ségréguée. Ces contrôles sont d'autant plus nécessaires que le couvercle présente des singularités géométriques liées aux adaptateurs et des conditions d'exploitation différentes de celles du fond (températures, manipulations du couvercle, etc.).

Le rapporteur souligne que le dossier technique transmis par Areva NP et EDF sur les contrôles de suivi en service est très succinct et qu'il n'apporte aucun élément technique sur la faisabilité des contrôles, leur performance et les conditions d'intervention en termes de radioprotection.

Le rapporteur considère ainsi que l'aptitude au service du couvercle actuel de la cuve du réacteur EPR de Flamanville n'est pas acquise de manière pérenne en l'absence de contrôles non destructifs suffisants pour renforcer le deuxième niveau de défense en profondeur. Le rapporteur

constate qu'EDF n'est actuellement pas en mesure de mettre en œuvre des contrôles non destructifs du couvercle de même portée et aux mêmes échéances que pour le fond de la cuve.

Aussi le rapporteur considère que l'utilisation du couvercle actuel de la cuve du réacteur EPR de Flamanville ne saurait être envisagée au-delà de quelques années de fonctionnement sans que les contrôles nécessaires au renforcement du deuxième niveau de défense en profondeur n'aient été mis en œuvre.

* * *

Annexe 1 : Tableaux et figures

Liste des tableaux

Tableau 1 : Spécification des défauts inacceptables dans les calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville	27
Tableau 2 : Contrôles non destructifs réalisés dans le cadre des engagements Areva NP	29
Tableau 3 : Contrôles non destructifs réalisés pour répondre aux demandes de l'ASN	31
Tableau 4 : Analyse des performances des méthodes de contrôles non destructifs	32
Tableau 5 : Comparaison des performances entre les méthodes de contrôles	33
Tableau 6 : Résultats obtenus pour quatre défauts débouchants de longueur 5 mm et de hauteur 2,5 mm remplis d'oxydes.....	34
Tableau 7 : Synthèse des contrôles réalisés par Areva NP sur la calotte inférieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville	35
Tableau 8 : Synthèse des contrôles réalisés par Areva NP sur la calotte supérieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville.....	36
Tableau 9 : Synthèse du programme d'essais par calotte et laboratoire	40
Tableau 10 : Taux de surveillance du programme d'essais.....	49
Tableau 11 : Estimation chiffrée de la surveillance par Bureau Veritas Exploitation (en homme.jour).....	49
Tableau 12 : Bilan des écarts traités par Bureau Veritas Exploitation	50
Tableau 13 : Comparaison des compositions chimiques à la coulée des calottes supérieures FA3, UA et UK.....	52
Tableau 14 : Comparaison des compositions chimiques à la coulée des calottes inférieures FA3 et UA	53
Tableau 15 : Paramètres essentiels de coulée et de solidification des calottes supérieures FA3, UA et UK, et inférieures FA3 et UA	53
Tableau 16 : Taux de chute des calottes supérieures FA3, UA et UK, et inférieures FA3 et UA	54
Tableau 17 : Comparaison des teneurs de carbone à la coulée et sur éprouvettes testées en zone de recette	56
Tableau 18 : Mesures de teneur en carbone en surface interne	57
Tableau 19 : Mesures de teneur en carbone maximale en surface externe et estimation statistique du maximum à partir des cartographies surfaciques.....	57
Tableau 20 : Paramètres de trempe des calottes supérieures FA3, UA et UK, et inférieures FA3 et UA	58
Tableau 21 : Épaisseurs usinées après traitement thermique de qualité.....	58
Tableau 22 : Vitesses de refroidissement entre 800 °C et 600 °C pour les profondeurs caractéristiques	59
Tableau 23 : Propriétés mécaniques en zone de recette extraites du rapport de fin de fabrication.....	60
Tableau 24 : Caractéristiques de résilience en zone de recette	61
Tableau 25 : Températures de transition issues des essais de ténacité en zone de recette	62
Tableau 26 : Années de fabrication des calottes	68
Tableau 27 : Teneurs en carbone et vitesses de trempe aux différentes profondeurs des calottes UK Sup, UA Inf et UA Sup où ont été prélevées les éprouvettes.....	70
Tableau 28 : Décalage des limites d'élasticité et à rupture à 330 °C et allongement minimal [13].....	72
Tableau 29 : Synthèse des résultats issus des essais de résilience en zone ségréguée (T_{CV} , T_{68J} , ΔT_{68J} et niveau de résilience au palier ductile) [13].....	74
Tableau 30 : Température de transition en zone de recette.....	76
Tableau 31 : Calotte supérieure UK – Évolution de la RT_{NDT} en fonction de la teneur en carbone.....	76
Tableau 32 : Calotte inférieure UA – Évolution de la RT_{NDT} en fonction de la teneur en carbone	76
Tableau 33 : Calotte supérieure UA – Évolution de la RT_{NDT} en fonction de la teneur en carbone.....	77
Tableau 34 : Température de référence et température d'indexation optimale de la courbe RCC-M en zone de recette	80

Tableau 35 : Température de référence T_0 et décalage de T_0 dans l'épaisseur des calottes sacrificielles	80
Tableau 36 : Température d'indexation optimale de la courbe du RCC-M.....	84
Tableau 37 : Ténacité dans le domaine ductile mesurée en zone ségréguée des calottes sacrificielles	84
Tableau 38 : Calotte supérieure – Température d'indexation de la courbe RCC-M à retenir pour l'analyse du risque de rupture brutale	92
Tableau 39 : Calotte inférieure - Température d'indexation de la courbe RCC-M à retenir pour l'analyse du risque de rupture brutale.....	92
Tableau 40 : Dossier d'Areva NP : Transitoires de choc chaud des dossiers des situations et additionnels aux dossiers des situations	98
Tableau 41 : Dossier d'Areva NP – Transitoires de choc froid du dossier des situations et additionnels aux dossiers des situations	99
Tableau 42 : Coefficient de sécurité de l'annexe ZG 3230 du code RCC-M.....	108
Tableau 43 : Synthèse des défauts étudiés indépendamment et méthode de calculs des facteurs d'intensité de contraintes associés	110
Tableau 44 : Transitoires de type choc chaud les plus pénalisants pour chacune des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville retenus par Areva NP	111
Tableau 45 : Transitoires de type choc froid les plus pénalisants pour chacune des calottes de la cuve du réacteur EPR de Flamanville retenus par Areva NP.....	111
Tableau 46 : Pression et température d'épreuve hydraulique.....	111
Tableau 47 : Marges à la rupture en situation d'épreuve hydraulique de fin de fabrication pour un défaut en peau externe (zone la plus pénalisante) [11] [72]	112
Tableau 48 : Calotte supérieure - Facteurs de marge F_m minimaux et RT_{NDT} admissibles en peau externe et en peau interne [11] [72].....	113
Tableau 49 : Calotte inférieure - Facteurs de marge F_m minimaux et RT_{NDT} admissibles en peau externe et en peau interne [11] [72].....	113
Tableau 50 : Marge à la rupture pour un défaut de 20 mm en peaux externes des calottes de cuve FA3 [11].....	114
Tableau 51 : Engagements d'EDF en matière de contrôle en service par essais non destructif volumiques [78] [81]	128

Liste des tableaux en annexe

Tableau A1. : Besoin de renforcement des règles de conduite	146
Tableau A2. : Besoin de renforcement des règles de conduite (Suite).....	147
Tableau A3. : Facteurs de marge pour les transitoires de chocs chauds de la calotte supérieure étudiés, pour un défaut débouchant en peau externe et un ΔRT_{NDT} (ZS) de 70 °C.....	181
Tableau A4. : Facteurs de marge pour les transitoires de chocs chauds de la calotte inférieure étudiés, pour un défaut débouchant en peau externe et un ΔRT_{NDT} (ZS) de 70 °C.....	181
Tableau A5. : Facteurs de marge pour les transitoires de chocs froids de la calotte supérieure étudiés, pour un défaut à ¼ d'épaisseur de la paroi interne et un ΔRT_{NDT} (ZS) de 35 °C.....	181
Tableau A6. : Facteurs de marge pour les transitoires de chocs froids étudiés pour la calotte inférieure, pour un défaut à ¼ d'épaisseur de la paroi interne et un ΔRT_{NDT} (ZS) de 35 °C.....	182
Tableau A7. : Facteurs de marge pour les transitoires de chocs froids étudiés pour la calotte supérieure, pour un défaut débouchant en peau interne et un ΔRT_{NDT} (ZS) de 35 °C.....	182
Tableau A8. : Facteurs de marge pour les transitoires de chocs froids étudiés pour la calotte inférieure, pour un défaut débouchant en peau interne et un ΔRT_{NDT} (ZS) de 35 °C.....	182
Tableau A9. : Demandes des lettres de position de l'ASN [7] et [10] et engagements Areva NP [26]	185

Liste des figures

Figure 1 : Représentation de la cuve du réacteur EPR de Flamanville.....	19
Figure 2 : Position de la ségrégation majeure positive au cours du forgeage	20
Figure 3 : Structure et ségrégation du carbone d'un lingot conventionnel	20
Figure 4 : Courbe ZG 6110 du code RCC-M.....	22
Figure 5 : Effet du décalage de la température de transition sur la ténacité.....	23
Figure 6 : Démarche générale de justification	25
Figure 7 : Zones non contrôlées sur la calotte supérieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville pour ce qui concerne la recherche de défauts sous revêtement	31
Figure 8 : Coupe d'une calotte – identification des zones de recette et de la zone ségrégée	38
Figure 9 : Étapes de préparation d'une calotte du stade « demi-calotte » jusqu'au plan de prélèvement dans les tranches	41
Figure 10 : Découpe des tranches dans les blocs de matière ségrégée (exemple : calotte supérieure UK)	41
Figure 11 : Plan de prélèvement au quart de l'épaisseur de la calotte supérieure UK.....	42
Figure 12 : Déroulement du programme d'essais sur les calottes sacrificielles.....	42
Figure 13 : Exemple de reconstitution du positionnement (FA3 sup).....	55
Figure 14 : Positionnement des différentes calottes dans le bloom de référence.....	55
Figure 15 : Résultats des simulations numériques des opérations de trempe : évolution de la vitesse de refroidissement lors de la trempe en fonction de la distance à la surface.....	59
Figure 16 : Résultats des simulations numériques des opérations de trempe : évolution de la vitesse de refroidissement lors de la trempe au travers de l'épaisseur des calottes.....	60
Figure 17 : Courbes de transition en zone de recette.....	61
Figure 18 : Principe de détermination de T_{env}	62
Figure 19 : Évolution de la teneur en carbone maximale.....	64
Figure 20 : Évolution du taux de ségrégation maximal (teneur en carbone relative à la coulée)	64
Figure 21 : Évolution du taux de ségrégation maximal (teneur en carbone relative à la valeur médiane de recette)	64
Figure 22 : Évolution de la teneur en carbone maximale des calottes sacrificielles avec prise en compte des incertitudes	65
Figure 23 : Évolution de la teneur en carbone maximale – comparaison des calottes avec les données MOPPEC post-traitées, majorées et minorées	66
Figure 24 : Teneur en carbone maximale mesurée sur les éprouvettes testées dans l'épaisseur de chaque calotte sacrificielle	70
Figure 25 : Évolution en fonction de la température de la limite d'élasticité $R_{p0,2}$ (graphique du haut) et de la limite à rupture R_m (graphique du bas).....	71
Figure 26 : Décalage des limites d'élasticité et à rupture à 330 °C de la zone ségrégée par rapport à la zone de recette, en fonction de la position dans l'épaisseur.....	72
Figure 27 : Comparaison des courbes de transition en zone ségrégée comparativement à la zone de recette pour la calotte UA Sup présentant la teneur en carbone la plus élevée	73
Figure 28 : Évolutions de T_{68J} en fonction de la position dans l'épaisseur des calottes sacrificielles.....	73
Figure 29 : Évolutions du décalage de T_{68J} en fonction de la position dans l'épaisseur des calottes sacrificielles.....	74
Figure 30 : Évolution de la résilience et de la teneur en carbone le long de l'axe de la carotte prélevée dans la calotte UA Sup – Essais de flexion par choc réalisés à 0 °C [8].....	75
Figure 31 : Évolution de la RT_{NDT} en zone ségrégée dans l'épaisseur des calottes sacrificielles	77
Figure 32 : Évolution du décalage de RT_{NDT} en zone ségrégée dans l'épaisseur des calottes sacrificielles	78
Figure 33 : Exemple d'application donnée par le rapporteur de l'approche Master Curve Bornes de tolérance à 50 %, 5 % et 95 %	79

Figure 34 : Évolution de T_0 dans l'épaisseur des calottes UK, UA.....	81
Figure 35 : Évolution du décalage de T_0 entre la zone ségréguée et la zone de recette dans l'épaisseur des calottes UK, UA.	81
Figure 36 : Positionnement des données de ténacité pour les éprouvettes prélevées au quart de l'épaisseur des calottes sacrificielles [13].....	82
Figure 37 : Positionnement des données de ténacité issues du programme d'essais par rapport à la courbe du RCC-M [13].....	83
Figure 38 : Positionnement par rapport à la courbe du RCC-M des données de ténacité issues d'essais sur éprouvettes avec des teneurs en carbone supérieures ou égales à 0,25 % [13].....	83
Figure 39 : Teneur en carbone des éprouvettes de ténacité testées dans le domaine ductile.....	85
Figure 40 : Faciès de rupture typique d'une éprouvette CT25 testée à 50 °C et 330 °C.....	86
Figure 41 : Évolution de la température de référence T_0 en fonction de la teneur en carbone issue de l'exploitation par le rapporteur des résultats de ténacité du programme d'essais.....	89
Figure 42 : Comparaison des différentes températures d'indexation de la courbe du RCC-M examinée au regard de la teneur moyenne en carbone mesurée sur éprouvette, à vitesse de trempe comparable (~1300-1400 °C/h)	90
Figure 43 : Effet d'un choc thermique et d'une pression sur un défaut perpendiculaire à la peau.....	95
Figure 44 : Débit principal et débit de contournement du cœur en fonctionnement normal.....	104
Figure 45 : Localisation des défauts postulés.....	109
Figure 46 : Défaut d'orientation radiale.....	122
Figure 47 : Défauts simulés pour le contrôle par ultrasons	123
Figure 48 : Orientation des défauts recherchés - vue du dessus de la calotte	129
Figure 49 : Partie centrale du couvercle de la cuve du réacteur EPR de Flamanville vue du dessus – zone à examiner et positions des défauts recherchés.....	130
Figure 50 : Partie centrale du couvercle de la cuve du réacteur EPR de Flamanville vue du dessus – possibilité de détecter des défauts à proximité immédiate des adaptateurs.....	131

Liste des figures en annexe

Figure A1. : Composants de la cuve du réacteur EPR de Flamanville	143
Figure A2. : Schéma du système RIS-RA connecté au circuit primaire.....	144
Figure A3. : Profils de la température fluide et de la pression primaire applicables en fond de cuve en cas de connexion d'un train RIS-RA en mode RA avec $T_{\text{sortie cœur}} > 135$ °C (cas 1)	150
Figure A4. : Profils de la température fluide et de la pression primaire applicables en fond de cuve en cas de connexion d'un train RIS-RA en mode RA avec $T_{\text{sortie cœur}} < 135$ °C (cas 2)	151
Figure A5. : Principe de la démarche d'Areva NP pour caractériser le choc chaud en 3 ^e catégorie issu de la situation de RCN suite à une petite brèche.....	153
Figure A6. : Profil de débit RCN retenu dans le dossier choc chaud	153
Figure A7. : Caractérisation du choc chaud dû à la RCN suite à une petite brèche du circuit primaire	154
Figure A8. : Mécanisme de reprise de la circulation naturelle (CN) suite à une brèche primaire [59].....	156
Figure A9. : Profils de débit « RCN enveloppe » pour les calculs de choc chaud [44]	156
Figure A10. : Débit principal et débit de contournement du cœur en fonctionnement normal	162
Figure A11. : Conception actuelle des soudures des adaptateurs du couvercle	166
Figure A12. : La cuve dans le bâtiment réacteur	167
Figure A13. : Découpe de la partie inférieure de la cuve en vue du remplacement de la calotte	169
Figure A14. : Vue de dessus d'une boucle du circuit primaire permettant d'identifier les tronçons de tuyauterie à remplacer	169
Figure A15. : Gamme de forgeage des calottes supérieure et inférieure FA3	171

Figure A16.	: Représentation de la zone la plus ségréguée sur la surface externe de la calotte supérieure UK (mesures par SEO - appareil du prestataire).....	172
Figure A17.	: Représentation de la zone la plus ségréguée sur la surface externe de la calotte supérieure UK (mesures par SEO - appareil d'Areva NP).....	172
Figure A18.	Représentation de la zone la plus ségréguée sur la surface externe de la calotte inférieure UA (mesures par SEO - appareil du prestataire)	173
Figure A19.	: Représentation de la zone la plus ségréguée sur la surface externe de la calotte inférieure UA (mesures par SEO - appareil d'Areva NP)	173
Figure A20.	: Représentation de la zone la plus ségréguée sur la surface externe de la calotte supérieure UA (mesures par CIR)	174
Figure A21.	: Représentation de la zone la plus ségréguée sur la surface externe de la calotte supérieure FA3 (mesures par SEO - appareil d'Areva NP).....	175
Figure A22.	: Représentation de la zone la plus ségréguée sur la surface externe de la calotte inférieure FA3 (mesures par SEO - appareil d'Areva NP).....	176
Figure A23.	: Teneur en carbone dans l'épaisseur de la calotte supérieure UK (mesures par SEO – appareil du prestataire)	177
Figure A24.	: Teneur en carbone dans l'épaisseur de la calotte inférieure UA (mesures par SEO – appareil du prestataire)..	177
Figure A25.	: Teneur en carbone dans l'épaisseur de la calotte supérieure UA (mesures par SEO – appareil du prestataire).	177
Figure A26.	: Synthèse des cartographies de teneur en carbone par profondeur (mesures par CIR).....	178
Figure A27.	: Calotte supérieure – Défaut de 10 mm en peau externe – Température d'indexation de 19 °C - Évolution du facteur d'intensité de contraintes et de la ténacité en fonction de la température pour les situations dimensionnantes	180
Figure A28.	: Calotte inférieure – Défaut de 10 mm en peau externe - - Température d'indexation de 19 °C -Évolution du facteur d'intensité de contraintes et de la ténacité en fonction de la température pour les situations dimensionnantes	180

Annexe 2 : Schémas et composants de la cuve du réacteur EPR de Flamanville

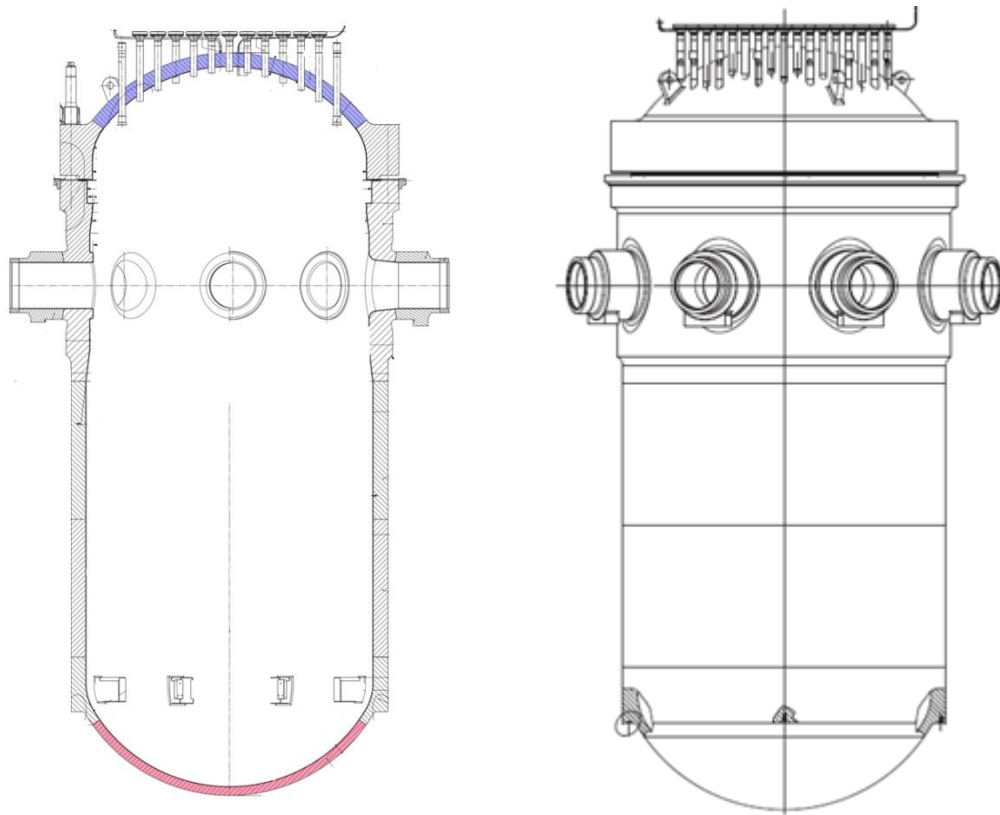


Figure A1. : Composants de la cuve du réacteur EPR de Flamanville
Les calottes sont identifiées en couleur.

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.

Annexe 3: Schéma du circuit primaire et des systèmes connectés, notamment le système RIS-RA

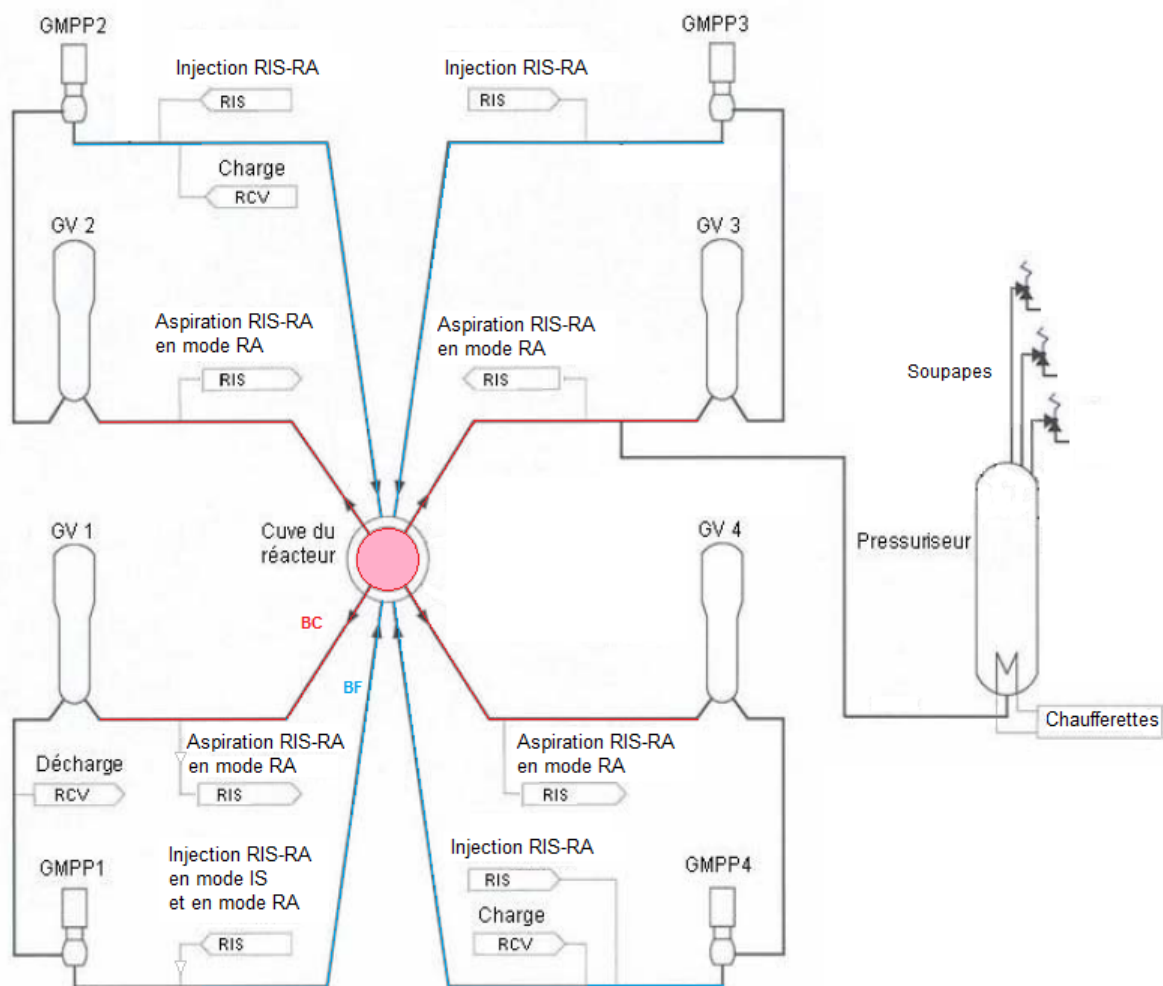


Figure A2. : Schéma du système RIS-RA connecté au circuit primaire

Annexe 4 : Analyse des chargements thermomécaniques - Points communs aux situations thermohydrauliques de choc chaud et de choc froid

Dans cette annexe, le rapporteur analyse les points communs entre les situations de choc chaud et de choc froid que constituent :

- le caractère pénalisant de l'estimation du coefficient de transfert thermique entre le fluide et la structure utilisé pour caractériser les situations pertinentes ne recourant pas à un coefficient d'échange de valeur infinie ;
- le caractère pénalisant des évolutions des paramètres thermohydrauliques des situations de fonctionnement de 2^e catégorie qui sont définies notamment par les règles de conduite normale.

Coefficient d'échange

Pour certaines situations de choc chaud ou de choc froid, Areva NP utilise un coefficient d'échange variable (en fonction notamment de la vitesse d'écoulement) issu de corrélations de la littérature. S'agissant d'un paramètre dominant, le rapporteur a demandé à Areva NP de retenir un coefficient d'échange multiplié forfaitairement par deux afin de prendre en compte les incertitudes associées.

Par ailleurs, pour la calotte inférieure, la vitesse de l'écoulement (paramètre intervenant dans le calcul du coefficient d'échange en convection forcée) est déterminée à partir du débit et de la section de passage en bas de la descente annulaire. Or, l'exploitation d'un calcul tridimensionnel de thermohydraulique local de type CFD (Computational fluid dynamics) réalisé par Areva NP montre que ce choix peut conduire à sous-estimer fortement la vitesse d'écoulement le long de la paroi et ainsi le coefficient d'échange. Suite à ce constat, Areva NP a procédé à une révision de son dossier en réévaluant, sur la base du calcul CFD [61], la vitesse pour chaque situation de choc froid concernée [62]. Toutefois, ces réévaluations exploitent, pour toutes les situations concernées, les résultats d'un seul calcul CFD simulant l'injection de 50 kg/s d'eau froide à 15 °C dans chacune des boucles à partir d'un état initial à 250 °C. La vitesse retenue est basée sur le calcul CFD et corrigée par le rapport des débits injectés. Le rapporteur a estimé que, en l'absence d'études de sensibilité, l'utilisation d'un seul calcul CFD ne permettait pas d'avoir l'assurance que son exploitation, pour des configurations très différentes, permet d'obtenir des vitesses enveloppes.

En fin d'instruction, Areva NP a transmis [82] des calculs CFD complémentaires qui montrent que son hypothèse d'extrapolation sur la seule base du calcul à 50 kg/s conduit dans tous les cas à une évaluation conservatrice des vitesses en fond de cuve et par conséquent à une estimation conservatrice du coefficient de transfert thermique. Ce point n'appelle donc *in fine* pas de remarque de la part du rapporteur.

Caractérisation des situations de 2^e catégorie – Calotte supérieure et calotte inférieure

Les transitoires de 2^e catégorie les plus pénalisants pour les calottes sont les situations de la famille 20. En particulier, les situations 20E-3P (situations de surpression à froid liée notamment à un démarrage intempestif de l'injection de sécurité) sollicitent davantage la calotte inférieure et les situations 20A345b (situations de fluctuation de température en état d'arrêt à froid monophasique) davantage la calotte supérieure. Ces situations sont définies par des variations de température et de pression qui tiennent compte du retour d'expérience d'exploitation des réacteurs en fonctionnement. En effet, Areva NP considère qu'elles couvrent les variations qui

seront effectivement observées sur le réacteur EPR de Flamanville en fonctionnement normal. Bien qu'il ne soit pas possible, en l'absence de retour d'expérience du fonctionnement du réacteur EPR de Flamanville, de se prononcer sur le degré de conservatisme de ces caractérisations, le rapporteur considère que les règles de conduite normale garantissent le respect des limites de la caractérisation des transitoires les plus pénalisants de 2^e catégorie.

À cet égard, à la suite de la mise en évidence de ségrégations majeures positives résiduelles du carbone observées sur certains fonds primaires de générateur de vapeur, des modifications des règles d'exploitation ont été mises en place par EDF sur les réacteurs concernés [63]. Le rapporteur a donc demandé à Areva NP de dresser un bilan comparatif des règles de conduite du parc en fonctionnement et du réacteur EPR de Flamanville. Ce bilan est présenté dans les Tableau A1 et Tableau A2.

Définition des mesures compensatoires pour la justification des fonds de GV ségrégués du parc	Objectif de la mesure vis-à-vis des fonds de GV 900 et N4	Analyse Areva NP du besoin du renforcement des règles de conduite vis-à-vis des calottes de cuve FA3
Arrêt du dernier GMPP possible si écart de température entre refoulement RRA et la sortie GV inférieure à 30 °C	Garantir une limitation de l'amplitude des chocs chauds (bouchon situé dans les tubes de GV) à 30 °C, valeur retenue dans le DDS 900.	Les calculs mécaniques de robustesse montrent que ce scénario d'envoi d'un bouchon chaud (T _{max} = 55 °C/120 °C) formé dans les GV n'est pas nocif sur les calottes de cuve → modification de règle de conduite non nécessaire.
Réduction des gradients de refroidissement sous 120 °C et de chauffage sous 60 °C à 14 °C/h quand le primaire est monophasique	Optimisation des situations de 2 ^e catégorie (situations 1X et 2X) pour restaurer des marges mécaniques. Mesure compensatoire nécessaire pour garantir des marges positives.	Les profils du DDS EPR (situations de refroidissement) sont justifiés par les calculs mécaniques → modification de règle de conduite non nécessaire.
Garantir T _{RCP} ≥ 30 °C en AN/RRA (avant la dépressurisation du primaire et des mouvements d'eau avec la piscine)	Optimisation des situations de 2 ^e et 3 ^e catégories initiées en AN/RRA pour restaurer des marges mécaniques. Mesure compensatoire nécessaire pour garantir des marges positives.	Les profils du DDS EPR sont justifiés par les calculs mécaniques → modification de règle de conduite non nécessaire.
Demande de dépressurisation du primaire à 7 bars au plus tôt après l'arrêt du dernier GMPP et après les essais périodiques	Optimisation des situations de 2 ^e catégorie (chocs froids instantanés) pour restaurer des marges mécaniques. Mesure compensatoire nécessaire pour garantir des marges positives.	Les profils du DDS EPR (choc froid instantané 55 °C - 15 °C à 55 bar) sont justifiés par les calculs mécaniques → modification de règle de conduite non nécessaire.
Limitation de la température IJPP ⁶² GMPP arrêtés : limitation du ΔT entre refoulement RRA et injection IJPP à 15 °C max	Optimisation des situations de 2 ^e catégorie (chocs froids instantanés) pour restaurer des marges mécaniques. Mesure compensatoire nécessaire pour garantir des marges positives.	Les profils du DDS EPR (choc froid instantané 55 °C - 15 °C à 55 bar) sont justifiés par les calculs mécaniques → modification de règle de conduite non nécessaire.

Tableau A1. : Besoin de renforcement des règles de conduite

⁶² IJPP : injection aux joints des pompes primaires

Définition des mesures compensatoires pour la justification des fonds de GV ségrégués du parc	Objectif de la mesure vis-à-vis des fonds de GV 900 et N4	Analyse Areva NP du besoin du renforcement des règles de conduite vis-à-vis des calottes de cuve FA3
Cyclage GV interdit si ΔT refoulement RRA et T _{ASG} supérieur à 15 °C	Garantir une limitation de l'amplitude des chocs froids (bouchon issu de l'équilibrage thermique entre le faisceau tubulaire et le secondaire rempli par l'ASG, sans considérer d'écoulement gravitaire du bouchon froid) à 15 °C. Hypothèse nécessaire pour garantir des marges positives.	Les profils du DDS EPR (choc froid instantané 55 °C - 15 °C à 55 bar) sont justifiés par les calculs mécaniques. Par ailleurs, le cyclage GV ne fait pas partie de la conduite EPR → modification de règle de conduite non nécessaire.
Limitation de l'hétérogénéité pressuriseur $T_{\text{phase liquide PZR}} - T_{\text{RIC}} < 15 \text{ °C}$ (utilisation de l'aspersion auxiliaire si besoin)	Limiter la formation d'un bouchon chaud au pressuriseur, pour garantir le respect de l'amplitude de 15 °C considérée dans le DDS.	Le bouchon chaud dans le pressuriseur ne peut circuler dans la cuve → modification de règle de conduite non nécessaire.
Arrêt de la dernière pompe primaire à 35 °C	Refroidir le faisceau tubulaire à une température proche de la température minimale du CPP pour limiter le différentiel de température entre le faisceau et le CPP. Bien que l'amplitude du choc thermique associé à la mise en mouvement de ces bouchons soit limitée par la mesure compensatoire sur la température métal VVP, cette mesure compensatoire a été maintenue afin d'éliminer pratiquement les bouchons chauds à l'arrêt des GMPP (transitoire dimensionnant en 2 ^e catégorie, présentant des marges faibles du fait du cumul avec les chargements sismiques)	Le choc froid instantané 55 °C-15 °C considéré dans le DDS EPR ne pose pas de problème de justification, et la mise en mouvement des bouchons chauds éventuels situés dans les tubes de GV n'est pas nocive pour les calottes de cuves → modification de règle de conduite non nécessaire.
Débrochage des GMPP suite à arrêt normal ou fortuit	Rendre impossible l'envoi de bouchon chaud/froid	Débrochage des GMPP déjà spécifié sur EPR → modification de règle de conduite non nécessaire

Tableau A2. : Besoin de renforcement des règles de conduite (Suite)

Areva NP en conclut qu'il n'est pas nécessaire de prévoir des modifications des règles d'exploitation prévues sur l'EPR de Flamanville pour les raisons suivantes :

- certaines mesures d'exploitation ajoutées sur les réacteurs en fonctionnement sont déjà prévues dans les règles de conduite normale du réacteur EPR de Flamanville, notamment le débrochage des GMPP après leur arrêt normal ;
- certaines opérations pouvant créer un choc froid ne sont pas prévues sur le réacteur EPR de Flamanville c'est le cas notamment du cyclage⁶³ des GV ;
- les calottes de cuve sont moins sollicitées mécaniquement que les fonds primaires de GV en cas de séisme⁶⁴.

Il convient de noter que, pour les réacteurs en fonctionnement, il a été demandé que, lors de l'arrêt d'un réacteur, le dernier GMPP soit arrêté seulement si l'écart de température entre le refoulement du RRA et les masses métalliques en sortie du GV côté secondaire est inférieur à

⁶³ Le cyclage des générateurs de vapeur est une conduite permettant d'accélérer le refroidissement du côté secondaire pour pouvoir y intervenir plus rapidement. Il consiste à remplir le secondaire avec de l'eau froide puis à l'évacuer, et ceci à plusieurs reprises.

⁶⁴ Pour mémoire, les règles de dimensionnement en vigueur requièrent de cumuler les charges dues à un séisme avec les autres charges dans les situations de 2^e catégorie.

30 °C. Cette mesure permet de garantir une limitation de l'amplitude des chocs chauds à 30 °C, en cas d'envoi dans les fonds de GV d'un bouchon d'eau plus chaude formé dans les tubes de GV. Pour le réacteur EPR de Flamanville, suite à la demande du rapporteur, Areva NP a réalisé des calculs de robustesse [65] qui montrent qu'un scénario d'envoi d'un bouchon chaud de 120 °C formé dans les GV n'est pas nocif pour les calottes de cuve. Il en conclut que cette mesure compensatoire n'est pas nécessaire pour le réacteur EPR de Flamanville.

De même, pour justifier qu'aucune modification des règles de conduite normale n'est nécessaire, Areva NP indique que le choc froid instantané de 55 °C à 15 °C à 55 bar considéré dans le DDS du réacteur EPR de Flamanville (situation 20E-3P comprenant notamment le démarrage intempestif de l'injection de sécurité) n'est pas nocif pour les calottes de cuve et couvre les situations redoutées. Cependant, le rapporteur constate que ce choc ne sollicite pas la calotte supérieure (l'eau froide de l'injection de sécurité n'atteignant pas cette calotte). Par ailleurs, il s'agit d'un choc thermique postulant l'arrêt des pompes primaires (GMPP) qui ne couvre donc pas les situations où elles sont en fonctionnement. Enfin, pour les réacteurs en fonctionnement, le rapporteur constate que des chocs thermiques (chauds et froids) instantanés, GMPP en fonctionnement, sont considérés. Or, les situations équivalentes pour le réacteur EPR de Flamanville sont basées sur des gradients de température moins pénalisants, de 40 à 50 °C/h. Par conséquent, le rapporteur a demandé à Areva NP d'évaluer l'effet de chocs thermiques (chauds et froids) instantanés, GMPP en fonctionnement, et ce pour les deux calottes de cuve.

En réponse, Areva NP, bien qu'estimant que la caractérisation demandée ne correspond à aucun initiateur identifié, a réalisé cette étude de robustesse. Elle montre que la modélisation dimensionnante de la situation 20A345b de fluctuations primaires de 2^e catégorie par un créneau est effectivement plus pénalisante pour les deux calottes, et permet de s'assurer que tout dysfonctionnement envisageable des régulations et systèmes est couvert vis-à-vis du risque de rupture brutale en 2^e catégorie.

Compte tenu des éléments apportés au cours de l'instruction technique, le rapporteur considère acceptable de ne pas prévoir de modification des règles de conduite normale pour le réacteur EPR. En revanche, dans la mesure où ces règles permettent de limiter l'amplitude des transitoires de choc froid et de choc chaud sur les calottes de cuve pendant le fonctionnement normal et perturbé (situations de 2^e catégorie), le rapporteur considère que les critères correspondants doivent figurer à ce titre dans les spécifications techniques d'exploitation (STE) des règles générales d'exploitation (RGE).

Annexe 5 : Chargements thermomécaniques - Caractérisation des transitoires de choc chaud

Dans cette annexe, le rapporteur présente la caractérisation des transitoires de choc chaud proposée par Areva NP et analyse la pertinence de cette caractérisation pour les transitoires les plus pénalisants.

1) Transitoires de surpression à froid (DDS)

Au cours de l'instruction, le rapporteur a demandé à Areva NP de justifier le caractère enveloppe, du point de vue de la sollicitation appliquée à la calotte supérieure, des hypothèses retenues dans la description de la situation de surpression à froid monophasique liée à un déclenchement intempestif de l'injection de sécurité (IS). En effet, dans cette situation, la température initiale retenue au moment de l'injection de sécurité est de 55 °C (température maximale autorisant l'arrêt de la dernière pompe primaire). Si ce choix vise à maximiser le choc froid dans la descente annulaire et sur la calotte inférieure (de 55 °C à 15 °C), ce choc thermique n'est toutefois pas sollicitant pour la calotte supérieure, les GMPP étant à l'arrêt. En revanche, le démarrage intempestif de l'IS, en considérant que la température du fluide primaire est de 15 °C (température minimale envisageable), pourrait induire une surpression à froid plus pénalisante pour la calotte supérieure. Areva NP a réexaminé [57] les situations de surpression primaire initiées à une température de 15 °C. Il conclut que, vis-à-vis d'un défaut en peau externe de la calotte supérieure, ce nouvel état initial est plus pénalisant que celui initialement retenu, tout en restant acceptable. **Le rapporteur estime ces éléments satisfaisants et n'a plus de remarque sur la caractérisation retenue par Areva NP pour cette situation.**

2) Transitoires de choc chaud hors DDS

Areva NP a fourni la note [47] présentant une analyse des situations de choc chaud hors DDS et pénalisantes pour les calottes inférieure et supérieure. La caractérisation de ces situations a donné lieu à de nombreux échanges au cours desquels certaines hypothèses jugées non conservatives par le rapporteur ont été modifiées. La note de synthèse relative aux situations de choc chaud [43] et sa révision [44] présentent les caractérisations retenues pour chaque situation additionnelle. Les transitoires les plus pénalisants sont induits par une petite brèche primaire et une perte totale du refroidissement par le système de refroidissement à l'arrêt (RIS-RA en mode RA).

a) Transitoire de choc chaud hors DDS n°1 : Connexion du RIS-RA en mode RA suite à une petite brèche primaire (3^e catégorie)

Suite à l'apparition d'une petite brèche et à la dépressurisation du circuit primaire, les quatre trains RIS-RA sont mis en service en mode IS (injection de sécurité) pour compenser la perte en masse. Dans la mesure où l'arrêt des groupes moto-pompe primaires (GMPP) intervient au cours du scénario de l'accident, cette mise en service provoque dans un premier temps un choc froid sur la calotte inférieure suite à la perte de la circulation naturelle. Puis, sous certaines conditions, l'opérateur pourra arrêter les trains RIS-RA en mode IS et les basculer en mode RA (refroidissement à l'arrêt) l'un après l'autre. Lors de la connexion du RIS-RA en mode RA, l'eau chaude aspirée dans les branches chaudes est réinjectée dans les branches froides et la cuve, ce qui peut ainsi provoquer un choc chaud sur la calotte inférieure.

Areva NP considère que le choc thermique dimensionnant est lié au passage du premier train RIS-RA en mode RA. Le chargement thermohydraulique enveloppe retenu [43] correspond à un choc chaud instantané de 15 °C à 128 °C en prenant en compte le débit maximal délivré par une pompe RIS-RA en mode RA (soit 555 m³/h) et un débit d'IS minimal correspondant à une

brèche de 20 cm² (soit 270 m³/h). La température maximale du choc chaud (128 °C) correspond à la température de mélange parfait entre le débit du RIS-RA en mode RA, provenant des branches chaudes considérées à 180 °C (température maximale de connexion du RIS-RA en mode RA) et le débit d'injection de sécurité. De manière conservatrice, Areva NP considère un coefficient d'échange infini entre le fluide et la paroi.

Au cours de l'instruction, le rapporteur a interrogé Areva NP sur le caractère conservatif des hypothèses retenues. En effet, la prise en compte d'une taille de brèche plus petite pourrait conduire à un débit d'injection de sécurité plus faible et en conséquence à une température de mélange plus élevée.

À cet égard, Areva NP a recalculé le scénario de connexion du RIS-RA en mode RA en prenant en compte une taille de brèche de 5 cm² (plus petite taille de brèche conduisant à l'arrêt de la circulation naturelle dans le circuit primaire). Toutefois, pour la caractérisation de ce nouveau transitoire, Areva NP a relaxé l'hypothèse pénalisante associée à la température du bouchon d'eau chaude (180 °C). Ainsi, Areva NP a étudié deux configurations qui diffèrent par les actions de conduite à mener en fonction de la température obtenue en sortie du cœur (température supérieure ou inférieure à 135 °C). Pour chacun des cas, Areva NP a défini un nouveau profil de température justifié dans la note en référence [44] (voir Figure A3 et Figure A4).

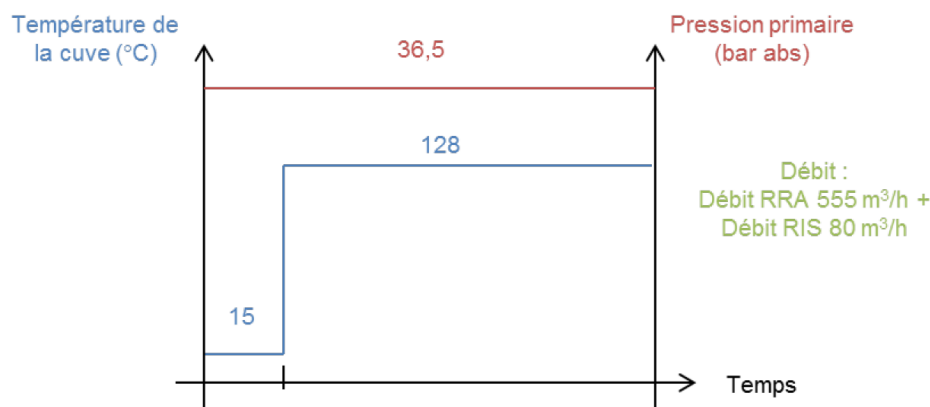


Figure A3. : Profils de la température fluide et de la pression primaire applicables en fond de cuve en cas de connexion d'un train RIS-RA en mode RA avec $T_{\text{sortie cœur}} > 135 \text{ °C}$ (cas 1)

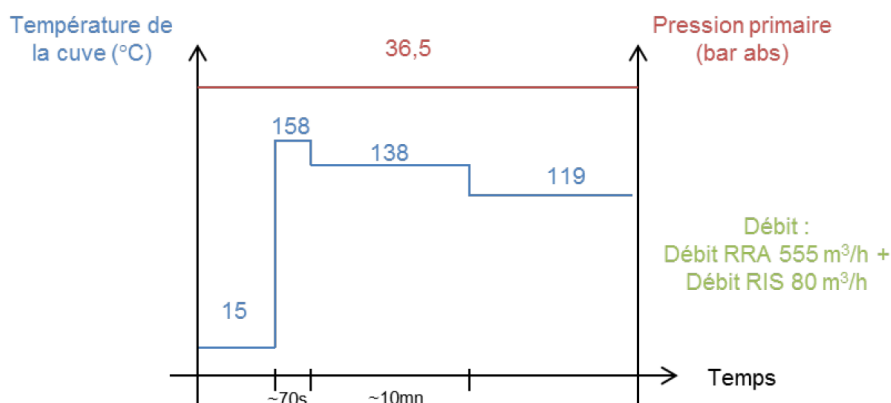


Figure A4. : Profils de la température fluide et de la pression primaire applicables en fond de cuve en cas de connexion d'un train RIS-RA en mode RA avec $T_{\text{sortie cœur}} < 135 \text{ °C}$ (cas 2)

Le profil de température le plus pénalisant correspond au cas où la connexion du RIS-RA en mode RA a lieu pour une température en sortie du cœur inférieure à 135 °C, la température en branche chaude étant inférieure à 180 °C (condition de connexion du RIS-RA en mode RA). Dans ce cas, le fond de cuve peut subir un choc chaud de 15 °C à 158 °C correspondant à la température de mélange entre le débit du RIS-RA en mode RA aspiré en branche chaude à 180 °C et le débit RIS à 15 °C. Ce premier palier dure le temps de vidanger l'eau à 180 °C contenue dans la branche chaude et la boîte à eau d'entrée du GV. Par la suite, la température de l'eau aspirée par le RRA en branche chaude résultera d'un mélange entre l'eau contenue dans les tubes GV, la boîte à eau et la branche en U à 180 °C et l'eau en sortie du cœur à 135 °C puis du mélange de ce débit avec l'eau de l'injection de sécurité injectée en branche froide. La température ainsi obtenue est de 138 °C. Enfin, une fois que l'eau contenue dans la branche est évacuée, la température appliquée en fond de cuve (119 °C) résulte du mélange de l'eau injectée par le RIS-RA en mode RA à la température de sortie du cœur (135 °C) et le débit d'injection de sécurité.

Areva NP estime [44] que le fait d'appliquer directement en fond de cuve la température de mélange entre le débit du RIS-RA en mode RA et le débit d'IS sans prendre en compte le mélange avec le volume d'eau froide contenu dans l'espace annulaire et le fond de cuve constitue un conservatisme. De plus, le choc thermique chaud est considéré instantané. Au vu du faible débit d'injection du système RIS-RA en mode RA (environ 150 kg/s), le rapporteur convient que la non prise en compte du volume d'eau froide contenu initialement dans la cuve ainsi que l'hypothèse de choc thermique instantané sont des sources de conservatisme.

Par ailleurs, Areva NP indique que le débit d'IS de 80 m³/h retenu dans l'étude est déterminé en considérant une hypothèse pénalisante sur les pertes de charge conduisant à minimiser le débit perdu à la brèche et le débit d'IS injecté, et maximisant ainsi la température de mélange calculée. Le rapporteur estime que cette hypothèse conforte le caractère conservatif du profil de température retenu pour cette situation.

Enfin, la non-prise en compte de l'échangeur entre le RIS-RA et le RRI (circuit de refroidissement intermédiaire) permettant de refroidir l'eau aspirée en branche chaude avant de la réinjecter en branche froide afin d'assurer le refroidissement du circuit primaire constitue également une source de conservatisme de l'étude.

Ainsi, le rapporteur considère que, malgré la relaxation de l'hypothèse sur la température du bouchon d'eau chaude, les profils retenus par Areva NP demeurent plus pénalisants ou

équivalents au profil initialement retenu.

En conclusion, le rapporteur considère conservatif les profils de température établis pour le transitoire de choc chaud induit par la connexion du RIS-RA en mode RA suite à une petite brèche primaire (3^e catégorie).

b) Transitoire de choc chaud hors DDS n°2 : Reprise de la circulation naturelle (RCN) à la suite d'une petite brèche primaire initiée en état A ou B (3^e et 4^e catégories)

Suite à la vidange partielle du circuit primaire induite par la brèche, la circulation naturelle s'arrête et un régime d'échange en mode caloduc⁶⁵ avec les générateurs de vapeur (GV) s'instaure. La vapeur produite dans le cœur se condense dans les GV et ce condensat d'eau chaude s'accumule dans les tubes et les boîtes à eau des GV. La température dans cette zone est au maximum égale à la température de saturation de l'eau à la pression primaire. Dans le même temps, le système RIS refroidit la descente annulaire et le fond de cuve par l'injection d'eau froide. Au bout d'un certain temps, le remplissage du circuit primaire s'amorce grâce aux moyens d'injection de sécurité, puis, si la taille de brèche est suffisamment faible, la circulation naturelle reprend et entraîne le bouchon d'eau chaude accumulée dans les boucles vers le fond de cuve. Compte tenu de l'arrêt des pompes primaires⁶⁶ au cours de cet accident, Areva NP considère que les chargements thermomécaniques induits ne sont applicables qu'à la calotte inférieure.

Le choc chaud a lieu à l'instant de la reprise de la circulation naturelle (RCN) qui dépend notamment de la taille de brèche et des débits de l'injection de sécurité. Areva NP a élaboré une approche en trois étapes afin de caractériser les paramètres thermohydrauliques associés à la RCN à tout instant d'un transitoire de brèche primaire de taille inférieure ou égale à 20 cm² en faisant varier les paramètres relatifs à l'IS et au débit de RCN. Le principe de cette approche figure dans la note en référence [43].

L'approche est déclinée en trois étapes :

- étape 1 : le refroidissement de la cuve est dû à l'injection des débits d'IS, ce qui provoque un choc froid sur la calotte inférieure. La température initiale du choc thermique est la température du métal minimale T_{PE} en peau externe de la calotte à l'instant de la RCN ;
- étape 2 : la température finale du choc thermique correspond à la température fluide maximale T_f en fond de cuve suite à la RCN et à l'envoi du bouchon d'eau chaude vers la cuve. T_f correspond à la température de mélange parfait entre le débit « chaud » de circulation naturelle dans le primaire et les débits « froids » en provenance de l'injection de sécurité (cf. Figure A5) ;
- étape 3 : l'analyse mécanique de la cuve est réalisée sur la base d'un choc chaud instantané de T_{PE} à T_f .

Par souci de simplification, les étapes 1 et 2 de la démarche sont découplées de manière à maximiser le choc froid initial puis le choc chaud lors de la RCN (Figure A5).

⁶⁵ Contrairement au fonctionnement normal dans lequel la puissance dégagée par le cœur est transférée du circuit primaire au circuit secondaire par circulation d'eau en phase liquide côté primaire, dans le régime en mode caloduc, le fluide primaire est vaporisé à la traversée du cœur pour ensuite être condensé au passage dans les générateurs de vapeur et revenir sous forme liquide à l'entrée du cœur. Dans ce cas, la puissance est évacuée du fait de la condensation dans les tubes GV.

⁶⁶ À l'arrêt des pompes primaires, le débit de balayage du dôme s'annule et le dôme n'est plus refroidi.

Ainsi, le choc froid se caractérise par un refroidissement de la cuve induit par les débits maximaux délivrés par les quatre trains de l'IS en service et une brèche en branche chaude. En revanche, le choc chaud est caractérisé avec les débits minimaux de deux trains de l'IS, ce qui correspond à une brèche en branche froide, en considérant un train en maintenance et un autre dont le débit est supposé perdu à la brèche.

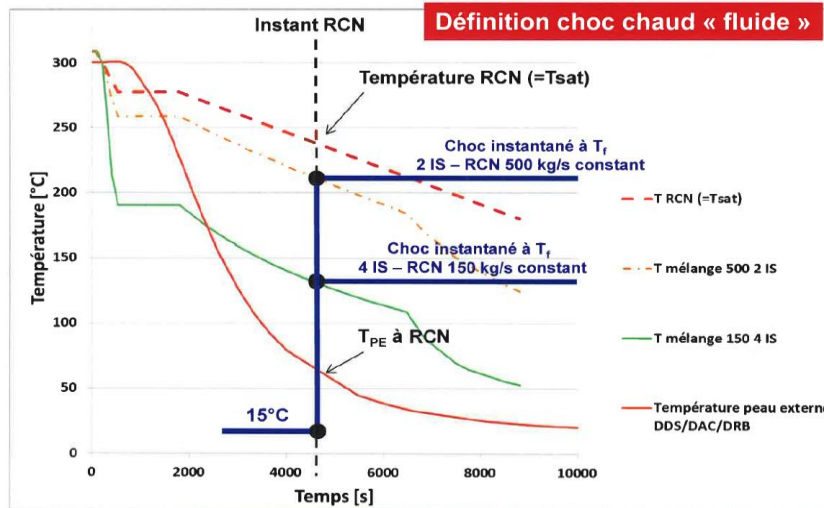


Figure A5. : Principe de la démarche d'Areva NP pour caractériser le choc chaud en 3° catégorie issu de la situation de RCN suite à une petite brèche

Par ailleurs, le profil du débit de reprise de circulation naturelle retenu par Areva NP valorise les résultats des essais PKL (installation expérimentale représentant à échelle réduite un réacteur à eau sous pression allemand de type Konvoi) transposés à l'échelle du réacteur EPR de Flamanville. Il prend également en compte les conclusions de l'instruction des études de dilution inhérente suite à une petite brèche primaire : un débit constant de 500 kg/s pendant 100 secondes puis une décroissance du débit jusqu'à 200 kg/s en 50 secondes sont retenus (cf. courbe noire Figure A6).

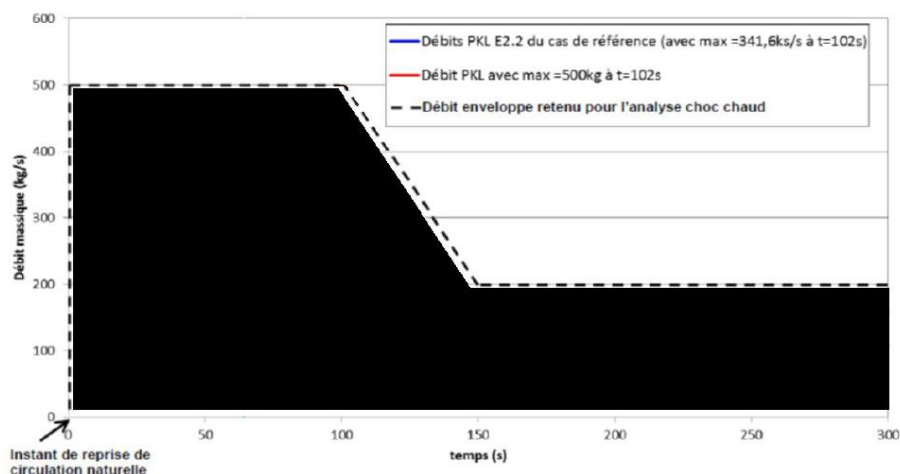


Figure A6. : Profil de débit RCN retenu dans le dossier choc chaud

L'application de cette démarche conduit Areva NP à retenir les chargements thermohydrauliques (évolution de température) présentés en Figure A7 en fonction de l'instant de RCN.

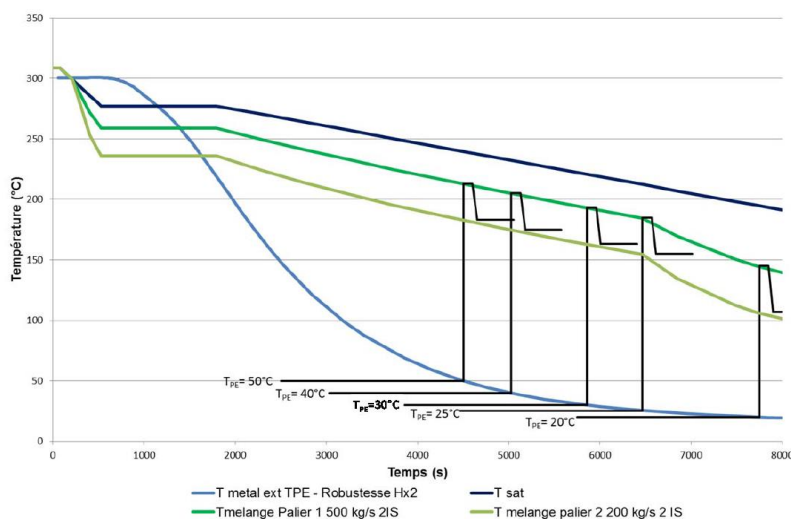


Figure A7. : Caractérisation du choc chaud dû à la RCN suite à une petite brèche du circuit primaire

La caractérisation de ce transitoire considère un échange parfait entre le fluide et la paroi (coefficient d'échange H infini) quand le débit de RCN est égal à 500 kg/s, puis un échange enveloppe des échanges par convection naturelle (H_{CN}) et forcée (H_{CF}) (selon la relation suivante : $H = 2 \times \max(H_{CN} ; H_{CF})$) quand le débit de RCN se stabilise à 200 kg/s.

Selon Areva NP, le transitoire de 3^e catégorie le plus pénalisant est obtenu quand la circulation naturelle reprend dans une boucle en considérant l'injection de deux trains IS en service (un train IS en maintenance préventive et un train IS alimentant directement la brèche) et pour une température initiale de la cuve en paroi externe de 30 °C.

Afin de compléter cette analyse, Areva NP a également étudié ce transitoire avec des hypothèses plus pénalisantes et en considérant des critères de 4^e catégorie. Ainsi, la température finale du choc thermique est prise égale à la température de saturation (pas de valorisation du mélange entre l'eau froide de l'IS et l'eau chaude du bouchon) et le coefficient d'échange entre le fluide et la paroi est considéré infini. Areva NP considère que cette étude complémentaire permet de couvrir les cas où la reprise de la circulation naturelle intervient dans plusieurs boucles simultanément.

Le rapporteur rappelle que la caractérisation initialement retenue par Areva NP dans la note [47] était un choc thermique instantané de 15 °C à 120 °C. La température finale du choc thermique étant obtenue en considérant un mélange parfait entre le bouchon d'eau chaude envoyé vers la cuve et le débit des quatre trains d'injection de sécurité disponibles. Le rapporteur a interrogé Areva NP sur le caractère enveloppe des hypothèses retenues pour décrire ce scénario (instant et pression de reprise de la circulation naturelle, température finale du choc, débit de reprise de circulation naturelle et nombre de boucles concernées, nombre d'IS disponibles) compte tenu des effets antagonistes entre certains paramètres. Ces interrogations ont conduit Areva NP à développer la démarche découplée, présentée précédemment, visant à assurer le caractère enveloppe du chargement thermomécanique calculé indépendamment de l'instant de reprise de la circulation naturelle et de la taille de brèche.

Tout d'abord, le rapporteur estime satisfaisante, dans le principe, cette démarche découplée. En effet, elle permet de simplifier l'approche en limitant le nombre d'études de sensibilité à réaliser en présence de nombreux paramètres ayant des effets antagonistes afin de garantir le caractère

conservatif de la caractérisation retenue.

Toutefois, l'analyse de cette démarche a amené un certain nombre de remarques qui portaient sur les hypothèses suivantes : la non prise en compte du maintien en pression du circuit primaire par l'injection de sécurité basse pression (ISBP), la prise en compte de la diminution du débit de reprise de la circulation naturelle et le nombre de boucles concernées par cette reprise. Ces points sont détaillés ci-après.

- Maintien en pression du circuit primaire par l'ISBP

En cas de reprise de circulation naturelle après l'atteinte du seuil d'injection de l'ISBP, la pression se stabiliserait à la pression de refoulement de l'ISBP. Le maintien en pression par l'ISBP peut avoir plusieurs effets pénalisants vis-à-vis du choc chaud, notamment un maintien de la température de saturation élevée et une diminution du débit d'injection de sécurité dans le circuit primaire. Ces deux phénomènes ont des effets directs sur la température de mélange induisant le choc chaud. De plus, le maintien en pression dans le circuit primaire entraîne une augmentation des contraintes mécaniques.

Interrogé sur ce point, Areva NP a indiqué [58] que la température primaire en sortie des GV est nécessairement égale (ou légèrement supérieure) à la température du circuit secondaire et ce malgré le maintien éventuel en pression lié à l'ISBP : cette température deviendrait dans ce cas sous-saturée. Le rapporteur estime recevable l'argument apporté par Areva NP. Par ailleurs, le maintien en pression intervient pendant que le pressuriseur se remplit. La reprise de la circulation naturelle interviendra alors que le circuit primaire sera dans un état monophasique. Le débit de circulation naturelle reprendra donc en monophasique à une valeur d'environ 200 kg/s sur le réacteur, au lieu de 500 kg/s actuellement retenu dans le dossier. La reprise de circulation naturelle avec un débit plus faible est bénéfique vis-à-vis de la température de mélange et couvre l'effet pénalisant du possible maintien en pression du circuit primaire par l'ISBP. En conclusion, cette étude n'est pas remise en cause par la non-prise en compte du maintien en pression du circuit primaire par l'ISBP. **Le rapporteur n'a pas d'autre remarque sur ce point.**

- Diminution du débit de RCN

Interrogé sur la justification du profil de débit de reprise de la circulation naturelle retenu (voir la Figure A6), Areva NP a apporté des éléments qui sont détaillés dans la note [59]. Il a tout d'abord rappelé les principaux phénomènes physiques gouvernant la reprise de la circulation naturelle (Figure A8). Puis il s'est basé sur les résultats d'essais PKL III pour définir une démarche permettant de vérifier le caractère conservatif du débit de reprise de la circulation naturelle considéré pour l'analyse du choc chaud, notamment la valeur du pic de débit et sa durée. À partir de ces observations, Areva NP a modifié le profil de débit et retient le profil suivant (Figure A9) :

- une montée rapide du débit jusqu'à une valeur donnée (débit maximum de 500 kg/s) ;
- un palier constant à cette valeur sur une durée correspondant au temps de balayage des volumes d'eau du cœur, du plenum supérieur et de la branche chaude par le débit diphasique considéré ;
- une chute brutale du débit jusqu'à la valeur de circulation naturelle monophasique (200 kg/s).

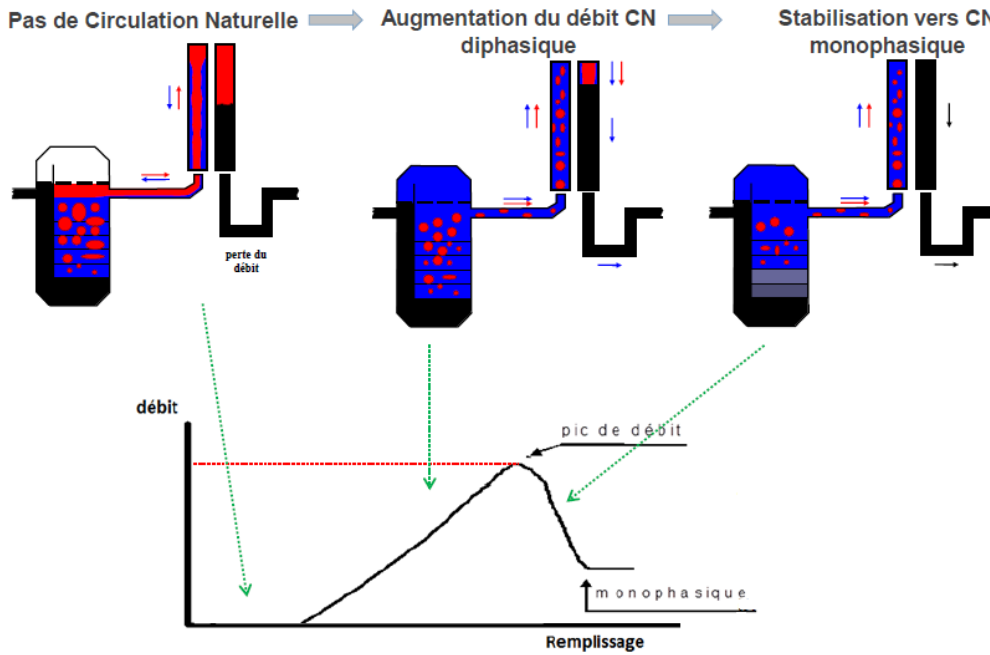


Figure A8. : Mécanisme de reprise de la circulation naturelle (CN) suite à une brèche primaire [59]

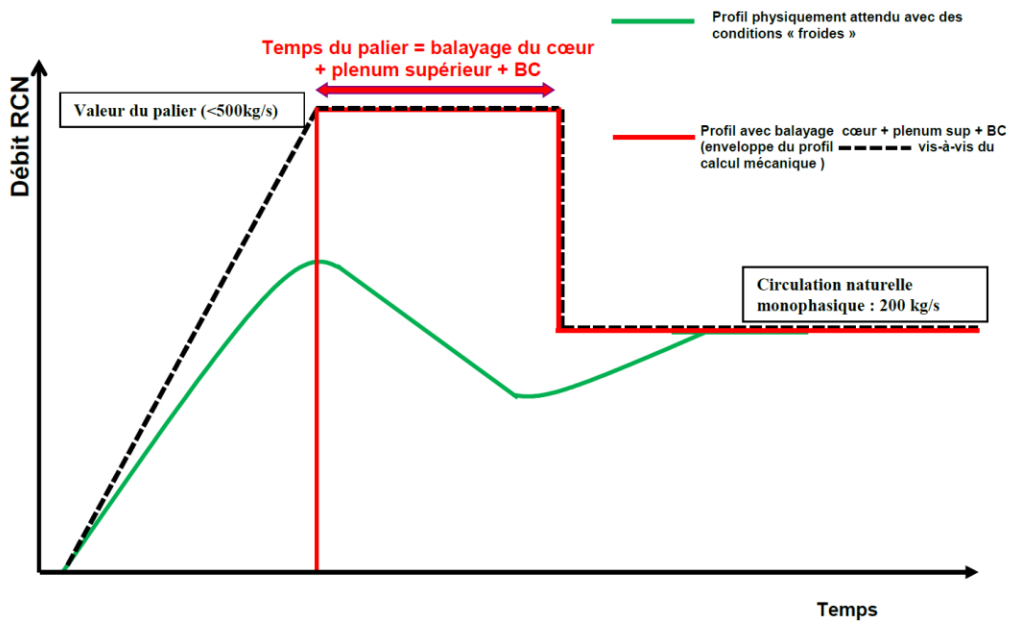


Figure A9. : Profils de débit « RCN enveloppe » pour les calculs de choc chaud [44]

La durée du palier est variable puisque dépendante de la valeur de débit de reprise de la circulation naturelle considérée. Il existe donc plusieurs couples (débit de RCN ; durée du palier) envisageables. Un débit important conduit à réduire la durée de balayage et à augmenter la température de mélange ; il n'est donc pas évident de définir le couple (débit ; durée) pénalisant le choc chaud sur la calotte inférieure. Areva NP a donc réalisé des études de sensibilité afin d'évaluer l'impact du profil de débit retenu. **Le cas le plus pénalisant est obtenu pour un débit maximal de 300 kg/s et une température initiale de la cuve égale à 30 °C.**

Dans son évaluation, Areva NP a considéré que le balayage des volumes du cœur et du plénum supérieur par le débit de reprise de la circulation naturelle est suffisant pour garantir la diminution du débit jusqu'à une valeur de 200 kg/s (débit monophasique). Le balayage de la branche chaude est également pris en compte afin de disposer d'une évaluation conservative. Le rapporteur estime cette démarche acceptable mais souligne que la durée du palier diphasique devrait aussi dépendre de la puissance résiduelle. En effet, si le débit entrant dans le cœur à une température donnée ne permet pas d'évacuer la puissance résiduelle du cœur en monophasique liquide, le débit de circulation naturelle sera nécessairement maintenu à une valeur élevée correspondant à un débit diphasique lié à la formation de vapeur en sortie du cœur. Le rapporteur a réalisé une évaluation permettant de vérifier que la puissance résiduelle du réacteur peut être évacuée en monophasique liquide, et ce pour plusieurs valeurs de débit de reprise de la circulation naturelle et en considérant deux trains IS injectant à une température de 15 °C. **Par conséquent, le rapporteur estime que le profil de débit retenu par Areva NP est acceptable.**

- Nombre de boucles concernées par la reprise simultanée de la circulation naturelle (envoi de deux bouchons)

Areva NP considère que la reprise de la circulation naturelle intervient dans une seule boucle lors d'un scénario d'accident de perte de réfrigérant primaire (APRP) en présence d'une petite brèche classée en 3^e catégorie. En effet, Areva NP estime peu probable la reprise simultanée de la circulation naturelle dans deux boucles (donc l'envoi de deux bouchons chauds) et considère donc que ce cas devrait au moins relever d'une situation de 4^e catégorie. De plus Areva NP fait valoir le fait que, lors des essais PKL, il n'a jamais été possible de créer les conditions de démarrage simultané de deux bouchons. À cet égard, le rapporteur rappelle [63] le très faible nombre d'essais disponibles (E1.1, E2.2 et F1.1) et les fortes réserves sur la représentativité de la boucle PKL (tant en termes de géométrie que de conditions d'essais) notamment vis-à-vis de la reprise de la circulation naturelle. De ce fait, le rapporteur considère que l'absence de reprise de circulation naturelle simultanée dans deux boucles dans les essais PKL ne permet pas d'exclure ce cas sur le réacteur EPR ni de justifier l'étude de ce scénario en 4^e catégorie.

Ainsi, à la demande du rapporteur, Areva NP a fourni une caractérisation de cette situation correspondant à une reprise de la circulation naturelle dans deux boucles et en considérant deux trains d'injection de sécurité disponibles qu'il a proposé d'analyser en 3^e catégorie. Cette caractérisation est jugée acceptable par le rapporteur.

Conservatisme de l'approche

Areva NP a estimé [66] que le profil thermohydraulique associé à ce scénario est conservatif compte tenu de sa construction et des hypothèses associées. En particulier, la démarche utilise un découplage en maximisant le choc froid sur la cuve puis en maximisant le choc chaud qui suit. Ainsi, pendant la phase de perte de circulation naturelle, un refroidissement maximal de la cuve est considéré (correspondant à une brèche en branche chaude avec quatre trains d'IS en service au débit unitaire maximal), et pendant la phase de reprise de circulation naturelle, une température maximale est prise en compte pour le choc chaud (correspondant à une brèche en branche froide avec seulement deux trains d'IS en service au débit unitaire minimal). Areva NP souligne le fait que le découplage retenu suppose l'occurrence de la reprise de la circulation naturelle à tout instant du transitoire indépendamment de la cohérence entre le débit d'IS, le débit à la brèche et la puissance résiduelle. Le rapporteur convient que ce transitoire découplé présente un caractère conservatif qui permet de couvrir de nombreuses configurations (fonction de la taille et position de la brèche, nombre et caractéristiques des systèmes, puissance résiduelle, etc.) et

d'identifier la configuration la plus pénalisante.

En conclusion, le rapporteur estime acceptable la caractérisation de cette situation.

c) Transitoire de choc chaud hors DDS n°3 : Perte du refroidissement par le RIS-RA en mode RA initiée en état C (4^e catégorie)

La perte du refroidissement par le RIS-RA en mode RA peut être initiée lorsque le RIS-RA est connecté au circuit primaire en mode RA, à partir de l'état C (état d'arrêt normal sur RIS-RA en mode RA). Elle conduit à un échauffement du fluide primaire à cause de la puissance résiduelle et de la puissance transférée au fluide primaire par les GMPP en service. La température du fluide primaire augmente jusqu'à atteindre la température de saturation des GV disponibles. De plus, du fait de la dilatation du fluide primaire, la pression primaire augmente jusqu'à atteindre potentiellement la pression de tarage à froid des soupapes de sûreté du pressuriseur⁶⁷.

Plusieurs variantes de ce scénario sont étudiées en fonction du nombre de pompes primaires en service et de l'état initial du réacteur (états C2 ou C3⁶⁸). La situation la plus pénalisante identifiée par Areva NP correspond à un état initial C3 sans GMPP. Elle conduit à un échauffement de 15 °C (température minimale de l'état C3) à 155 °C (température maximale correspondant à la température de saturation des GV à la pression d'ouverture des vannes de décharge à l'atmosphère VDA) avec un gradient de 415 °C/h et une pression de 68,5 bar (pression de tarage de la première soupape du pressuriseur majorée de son incertitude et du poids de la colonne d'eau). Le coefficient d'échange retenu est constant et enveloppe d'un échange thermique par convection naturelle.

Le rapporteur note qu'Areva NP étudie deux situations limitatives de perte des quatre trains ISBP/RA vis-à-vis du risque de rupture brutale des calottes inférieure et supérieure dans son dossier initial [47]. Il s'agit de situations initiées au cours de l'état C2, état pendant lequel la température est abaissée de 100 °C à 50 °C par la mise en service des quatre trains ISBP/RA, une à deux pompes primaires étant en service.

Au cours de l'instruction [48], le rapporteur a estimé qu'Areva NP devrait analyser le cas de perte totale du RIS-RA en état C3 sans GMPP afin de vérifier la pertinence du cas enveloppe retenu pour cette situation. En effet, en état C3, la température est maintenue sous 55 °C et les pompes primaires sont à l'arrêt. À cet égard, Areva NP indique [47] qu'une perte des trains ISBP/RA en état C3 serait moins pénalisante qu'en état C2 du fait d'une puissance résiduelle plus faible et de l'arrêt des GMPP. Le rapporteur convient de l'existence de ces effets favorables mais souligne que la température initiale est plus faible, ce qui est pénalisant. Par ailleurs, le volume de fluide à considérer devrait être plus faible en état C3 du fait de l'absence de circulation forcée dans la cuve, et donc la cinétique de l'échauffement pourrait être plus rapide. En outre, l'échange avec les parois est réduit en cas de faible débit.

⁶⁷ Pressions d'ouverture nominales des soupapes modifiées (64, 67 et 70 bar absolu) suite à l'activation de la protection contre les surpressions à froid dès que la température en branche froide est inférieure ou égale à 120 °C.

⁶⁸ Sous-états de l'état C, arrêt intermédiaire sur le circuit RIS-RA en mode RA. En état C2, la température est abaissée de 100 °C à 50 °C par la mise en service des quatre trains ISBP/RA, un à deux GMPP étant en service. En état C3, la température est maintenue sous 55 °C et les GMPP sont à l'arrêt.

En réponse, Areva NP a complété son dossier par l'étude de deux cas supplémentaires en état C3 : un cas avec GMPP à l'arrêt et un cas avec les quatre GMPP en service en vue d'un redémarrage de la tranche. L'analyse de ces deux cas supplémentaires a conduit à mettre en évidence un nouveau scénario plus pénalisant correspondant à la perte totale du RIS-RA en état C3 sans GMPP. La caractérisation du nouveau cas pénalisant (RIS-RA en état C3 sans GMPP) est présentée en [49]. Il s'agit d'un choc chaud de 15 °C à 155 °C en considérant une vitesse d'échauffement de 415 °C/h et une pression constante égale à la pression enveloppe d'ouverture de la première soupape de sûreté du pressuriseur.

La vitesse d'échauffement retenue [49] tient compte de la puissance résiduelle huit heures après la chute des barres de contrôle (entrée dans l'état C3), majorée de son incertitude et en limitant le volume d'eau primaire au volume d'eau dans le cœur et dans le plenum supérieur dans la mesure où les pompes primaires sont à l'arrêt. De plus, de manière pénalisante, ni les masses métalliques ni le volume d'eau contenu dans le dôme ne sont pris en compte dans ce calcul. Par ailleurs, les GMPP étant à l'arrêt, un coefficient d'échange constant et enveloppe d'un échange thermique par convection naturelle est retenu. Afin de prendre en compte les incertitudes sur la corrélation utilisée, le coefficient d'échange est multiplié par un facteur 2 conformément à la demande du rapporteur.

De plus, Areva NP a listé un certain nombre de conservatismes dans la description de cette situation [43]. La température initiale considérée dans l'étude correspond à la température minimale atteinte en fin d'état C3 alors que la puissance résiduelle est prise maximale, correspondant au début de l'état C3. Areva NP estime que cette démarche est conservatrice et permet de limiter les configurations à étudier. Les masses métalliques des internes de cuve ne sont pas prises en compte, ce qui conduit à pénaliser la vitesse d'échauffement calculée d'environ 100 °C/h. Enfin, la température de la calotte supérieure est prise égale à 15 °C sur toute l'épaisseur alors que la dernière pompe est arrêtée lorsque la température atteint 55 °C : toutes les pompes primaires étant arrêtées, le refroidissement de la calotte supérieure est limité (l'effet de densité s'oppose au refroidissement du dôme). La valeur de la température initiale de la calotte supérieure constitue donc un conservatisme important.

Après analyse, le rapporteur considère que les hypothèses retenues sont conservatives et permettent de définir une caractérisation enveloppe pour le transitoire de perte du refroidissement par le RIS-RA en mode RA initiée en état C en quatrième catégorie.

Annexe 6 : Chargements thermomécaniques - Exhaustivité et caractérisation des transitoires thermohydrauliques de choc froid de 3^e et 4^e catégories

Dans cette annexe, le rapporteur présente les situations de choc froid de 3^e et 4^e catégories les plus pénalisantes et leurs caractérisations, puis l'analyse de leur exhaustivité et de leur pertinence.

Exhaustivité des situations de choc froid les plus pénalisantes

Concernant les situations de 3^e et 4^e catégories, Areva NP a complété la liste des situations de choc froid initiale du DDS au cours de l'instruction en y ajoutant le transitoire d'éjection d'une grappe de commande suite à la rupture d'un carter qui provoquerait une brèche primaire au niveau de la calotte supérieure puis potentiellement un choc froid à la suite d'une sollicitation de l'injection de sécurité. À la suite de cet ajout, le rapporteur a demandé à Areva NP de justifier l'exhaustivité des situations retenues.

Areva NP a indiqué [56] que les transitoires pénalisants à considérer sont ceux qui présentent un refroidissement rapide du fluide avec une forte amplitude puis un maintien de la température atteinte, associé à une pression élevée.

Pour la calotte inférieure de la cuve, les transitoires retenus sont ceux présentés dans le DDS qui pénalisent l'arrivée d'eau froide et le maintien en pression. En effet, la caractérisation de ces situations est pénalisée pour s'assurer de la résistance mécanique des zones les plus sensibles du circuit primaire (indépendamment de la ségrégation du carbone), qui sont les tubulures d'entrée et de sortie et les viroles de cœur pour la cuve. Par conséquent, ces situations sont également pénalisantes vis-à-vis de la calotte inférieure de la cuve. **Le rapporteur considère qu'effectivement ces choix sont également pénalisants pour la calotte inférieure et que les situations retenues pour la zone du cœur sont également pertinentes pour le fond de cuve.**

Pour la calotte supérieure de la cuve, une analyse a été menée par Areva NP pour identifier les situations de choc froid pénalisantes. Cette analyse s'articule en deux phases :

- la première phase consiste à identifier les phénomènes physiques conduisant à la diminution rapide de la température du fluide dans le dôme de la cuve jusqu'à une température inférieure à 100 °C, associée à une pression élevée ;
- la seconde phase consiste à identifier les transitoires lors desquels se produisent les phénomènes physiques caractérisés lors de la première phase.

Cette analyse, du même type que celle employée pour s'assurer de l'exhaustivité des chocs chauds les plus pénalisants, est considérée satisfaisante par le rapporteur.

D'une manière générale, le rapporteur a demandé comment Areva NP a tenu compte, pour le réacteur EPR de Flamanville, du retour d'expérience des instructions relatives à la tenue en service des cuves des réacteurs de 900 et de 1300 MWe concernant l'exhaustivité des transitoires de choc froid. Pour mémoire, une démarche de sélection de transitoires additionnels au DDS a été initiée dans le cadre de l'instruction des dossiers de tenue en service des cuves (portant sur les viroles de cuve irradiées de la zone de cœur) sur les réacteurs en fonctionnement, pour vérifier l'exhaustivité du DDS et s'assurer du caractère enveloppe des situations présentes dans chacune des catégories. Cette démarche consiste à ajouter des défaillances défavorables vis-à-vis du choc froid, aux situations de 2^e et 3^e catégories puis de vérifier si la caractérisation des transitoires

associés aux situations actuelles du DDS couvre bien ces nouveaux transitoires. L'étude de ces transitoires additionnels relève du domaine de la vérification de la conception. Elle vient donc en complément du dossier de dimensionnement proprement dit. Areva NP a indiqué [60] que cette démarche, en cours d'application sur le parc, n'a pas conduit à ce jour à l'identification de transitoires plus sévères que ceux présents dans le DDS. Pour le réacteur EPR de Flamanville, Areva NP a indiqué [60] qu'en première analyse, il n'identifie pas de situation dont la caractérisation ne soit pas couverte par celle des situations actuelles du DDS.

Enfin, le rapporteur constate que la liste des situations du DDS du réacteur EPR de Flamanville couvre la liste des conditions de fonctionnement du rapport de sûreté (RDS), en particulier les conditions de fonctionnement du domaine complémentaire (situations appelées « RRC-A » pour *Risk Residual Category* sur le réacteur EPR). Ainsi, le DDS du réacteur EPR de Flamanville intègre les situations avec conduite en refroidissement maximal par le secondaire, les situations avec mise en œuvre de la conduite en gavé-ouvert⁶⁹, la situation de brèche primaire sans injection de sécurité et la situation de rupture de deux lignes vapeur supposée induite par un événement externe (chute d'avion). Le rapporteur considère satisfaisante la prise en compte de ces situations du domaine complémentaire.

Caractérisation des situations de choc froid de 4^e catégorie

- Éjection d'une grappe de commande (EDG)

Cette situation correspond à la rupture d'un carter d'une grappe de commande (cf. Figure A10), ce qui provoque son éjection ainsi qu'une brèche primaire de section maximale de 45 cm², localisée au niveau du couvercle de la cuve. Au cours de cette situation, du fait de la localisation de la brèche, l'eau froide injectée par l'IS alimentera rapidement et en permanence le dôme ce qui provoquera un choc froid important, en particulier au niveau de la calotte supérieure. Il s'agit de la situation de choc froid la plus pénalisante de 4^e catégorie pour la calotte supérieure, non étudiée dans le DDS et dont la caractérisation figure dans la note [55]. Cette caractérisation est obtenue à l'aide du logiciel CATHARE qui utilise un modèle simplifié pour représenter le volume sous le couvercle de la cuve. Areva NP a retenu la température moyenne calculée avec ce logiciel en sortie des guides de grappe pour caractériser la température du fluide au niveau de la calotte supérieure.

⁶⁹ La conduite en « gavé-ouvert » permet l'évacuation de la puissance résiduelle par ouverture des soupapes du pressuriseur et injection d'eau froide dans le cœur via le circuit d'injection de sécurité.

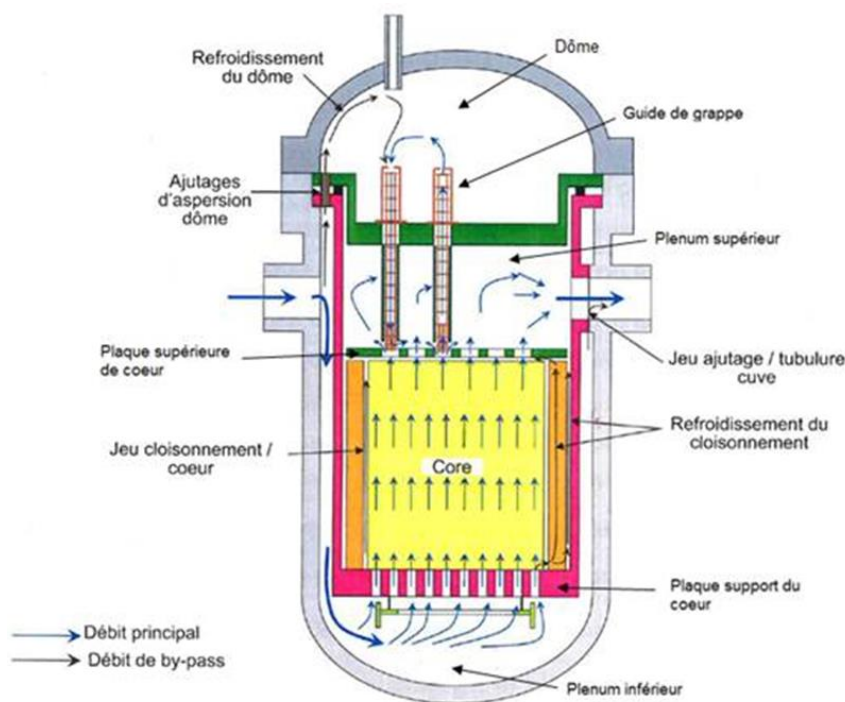


Figure A10. : Débit principal et débit de contournement du cœur en fonctionnement normal

Cependant, le rapporteur a estimé que l'ouverture d'une brèche par rupture d'un carter sous pression d'un mécanisme de commande de grappe peut conduire à un champ d'écoulement fortement dissymétrique dans la partie supérieure de la cuve et qu'il n'est pas acquis que la température moyenne en sortie des guides de grappe constitue une valeur conservatrice de la température du fluide au niveau de la calotte supérieure. En effet, la brèche peut être alimentée préférentiellement par le fluide froid en provenance des tubes guides de l'assemblage situé directement sous le carter rompu ainsi que par le débit des ajutages d'aspersion.

À cet égard, Areva NP a estimé [65] que le débit entrant dans le dôme en provenance des guides de grappe ne peut être issu directement du plenum inférieur (PI), notamment parce qu'il n'existe pas de trajet direct du fluide entre ce plenum et le dôme, les tubes guides débouchant en amont de la plaque supérieure de cœur (PSC) au niveau des embouts supérieurs d'assemblage. Par ailleurs, Areva NP a rappelé que le débit dans les tubes guides ne représente que quelques pourcents du débit circulant dans le cœur et ce même lorsque les GMPP sont arrêtés.

Le rapporteur constate que l'argumentaire d'Areva NP ne tient pas compte des effets de l'éjection de la grappe de commande sur l'écoulement vers le dôme. En particulier, cet argumentaire ne tient pas compte de l'augmentation importante de la section de passage dans le tube guide de l'assemblage concerné, ce qui a pour effet une diminution de la température de l'eau pénétrant dans le dôme. En revanche, le rapporteur estime de manière conservatrice à seulement quelques degrés cette diminution de température, ce qu'il ne juge pas significatif. **Le rapporteur n'a pas d'autre remarque à formuler sur la caractérisation de cette situation.**

- Suppression à froid de 4^e catégorie de brèche sur le circuit RIS-RA, en mode RA

Cette situation provoque dans un premier temps un choc froid lié à l'injection d'eau froide par l'injection de sécurité puis à une surpression lorsque l'opérateur isole la brèche. À la demande du rapporteur, Areva NP a caractérisé cette situation non identifiée dans le DDS et en a évalué l'effet sur la calotte inférieure en 4^e catégorie en utilisant un coefficient d'échange variable en

fonction du débit [57]. Areva NP estime que la calotte supérieure n'est pas concernée par cette situation du fait de l'interruption de la circulation du fluide suite à l'arrêt des pompes primaires. Le rapporteur considère que la caractérisation proposée par Areva NP supposant un choc froid instantané de 124 °C associé à une pression primaire de 74,5 bars (pression de tarage des soupapes de sûreté du pressuriseur en état C) est enveloppe.

Cependant, le rapporteur a noté qu'Areva NP estime que, malgré un choc froid bien plus important, cette situation est moins sollicitante que la situation de surpression à froid de 4^e catégorie liée au démarrage intempestif de l'IS étudiée dans le DDS.

Il s'est avéré que ceci provient du fait qu'Areva NP a valorisé un coefficient d'échange variable pour cette situation alors que, pour la situation étudiée dans le DDS, un coefficient d'échange infini est retenu de manière découplée. À cet égard, le rapporteur a rappelé que la vitesse d'écoulement du fluide utilisée pour calculer le coefficient d'échange en convection forcée est sous-estimée (cf. Annexe 4). Areva NP a donc évalué les conséquences de cette situation avec un coefficient d'échange infini. **Le rapporteur n'a plus de remarque sur la caractérisation ainsi modifiée de cette situation, qui devient la situation de choc froid la plus pénalisante en 4^e catégorie pour la calotte inférieure.**

Par contre, le rapporteur considère que ce transitoire peut solliciter également la calotte supérieure du fait des phénomènes de vidange et de remplissage potentiel du dôme par l'eau froide de l'IS. En fin d'instruction Areva NP a apporté des éléments montrant qu'un choc froid instantané de 320 °C à 40°C associé à un coefficient d'échange fluide paroi infini n'est pas nocif vis-à-vis de la calotte supérieure de cuve. **Le rapporteur estime cette caractérisation satisfaisante.**

- Surpression à froid de 4^e catégorie d'ouverture intempestive d'une vanne RRA avec arrêt GMPP puis remise en service

L'ouverture intempestive d'une vanne RRA provoque un choc froid et l'arrêt des pompes primaires. En cas de redémarrage intempestif de l'une d'elles, l'eau froide se réchauffera lors de son passage dans les GV ce qui provoquera une surpression du fait de la dilatation. Il s'agit de la situation de surpression à froid de 4^e catégorie la plus pénalisante sur les réacteurs en fonctionnement mais elle n'est pas étudiée sur le réacteur EPR de Flamanville. Areva NP considère [53] qu'elle est couverte par la situation retenant une brèche sur le circuit RIS-RA, en mode RA. En effet, sur les réacteurs en fonctionnement, cette situation provoque un choc froid de 160 °C en 30 minutes à 30 bar à comparer à un choc froid instantané de 124 °C associé à une pression primaire de 74,5 bar dans le cas d'une brèche sur le circuit RIS-RA du réacteur EPR de Flamanville. **Le rapporteur considère acceptable l'argumentaire d'Areva NP et n'a pas d'autre remarque sur cette situation.**

- Situation d'ouverture intempestive d'une soupape de sûreté du pressuriseur suivie de sa refermeture

La situation d'ouverture intempestive d'une soupape de sûreté du pressuriseur, étudiée dans le DDS en 3^e catégorie, provoque un choc froid suite à l'injection de sécurité. Néanmoins, le cumul avec sa refermeture intempestive, qui provoquerait une surpression à froid, n'est pas étudié. Pour mémoire, cette situation apparaît dans la liste des transitoires potentiellement pénalisants identifiés par les études internationales [64].

Suite à la demande du rapporteur, Areva NP a transmis l'analyse de cette situation en [52] ainsi qu'un argumentaire justifiant le classement de cette situation en 4^e catégorie.

Le rapporteur constate que ce transitoire n'est pas le plus pénalisant même si cette situation était classée en 3^e catégorie et n'a pas d'autre demande sur ce point pour la calotte inférieure.

Concernant la calotte supérieure, cette situation provoque une vidange puis un remplissage du dôme dont la caractérisation a fait l'objet d'une consolidation en fin d'instruction. La caractérisation de cette situation finalement retenue par Areva NP est jugée pénalisante par le rapporteur.

Annexe 7 : Scénarios de remplacement des calottes

Cette annexe présente les scénarios de remplacement de la cuve étudiés par Areva NP et EDF. Ils ne sont pas instruits dans le cadre du présent rapport.

Rappel des demandes formulées par l'ASN à la suite des séances du GP ESPN des 30 septembre 2015 et 24 juin 2016

Dans sa lettre en référence [7], l'ASN a indiqué à Areva NP qu'une demande, au titre de l'article 9 de l'arrêté ESPN en référence [3], de mise en service d'un ESPN ne respectant pas l'ensemble des exigences réglementaires doit être justifiée au regard des avantages et inconvénients de solutions alternatives. En particulier, l'ASN a considéré, étant donné les enjeux en termes de sûreté associés à la cuve du réacteur EPR de Flamanville et sans préjuger des résultats des essais réalisés par Areva NP, qu'il était nécessaire d'étudier des scénarios techniques de réparation ou de remplacement de la cuve.

Des demandes dans ce sens ont été adressées à Areva par courrier de l'ASN en référence [7] :

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

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

Éléments transmis par Areva NP

Remplacement du couvercle de cuve

Dans le document en référence [15], Areva NP a étudié le scénario de remplacement du couvercle de la cuve destiné au réacteur EPR de Flamanville. Dans ce scénario, le fabricant a étudié les phases de conception, d'approvisionnement et de fabrication ainsi que les opérations de remplacement sur le site. Pour chacune des phases, le fabricant a estimé une durée des opérations.

Lors de l'examen de la phase de conception, le fabricant s'est interrogé sur la conception des soudures d'implantation des traversées du couvercle présentées sur la Figure A11. Ces soudures, dans leur conception actuelle, ne permettent pas la réalisation d'un contrôle par essais non destructifs de tout leur volume et présentent des difficultés de réalisation, compte tenu de leur géométrie et de la nature des matériaux à assembler (soudure en alliage Inconel 690). Les soudures initiales du couvercle de la cuve destinée au réacteur EPR de Flamanville ont ainsi toutes été refaites suite à ces difficultés. Les conditions de réparation avaient été présentées au GP ESPN lors de sa séance du 14 septembre 2011.

À la suite de son analyse, Areva NP considère qu'il n'est pas envisageable de concevoir un couvercle pour lequel les soudures sont contrôlables à 100 % de leur volume, mais que des améliorations sont possibles tant sur le plan des contrôles (améliorations basées sur des sondes ultrasons multiéléments) que sur la réalisation elle-même de la soudure (usinage d'un chambrage au niveau de la racine de la soudure).

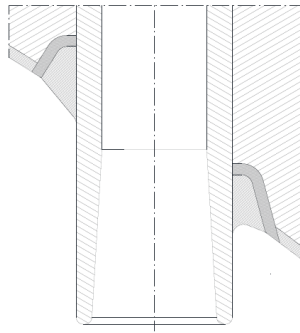


Figure A11. : Conception actuelle des soudures des adaptateurs du couvercle

En ce qui concerne l'approvisionnement des composants du couvercle (calotte et bride), le fabricant envisage de s'adresser au forgeron japonais JSW. Ces deux composants seraient approvisionnés en respectant l'exigence de qualification technique de l'arrêté ESPN en référence [3], afin de démontrer la maîtrise du risque d'hétérogénéité et d'assurer que les caractéristiques requises seront atteintes. Areva NP considère que les connaissances acquises par le forgeron JSW et sa capacité à maîtriser les risques d'hétérogénéité permettront d'assurer que la pièce sera exempte de ségrégation majeure positive du carbone préjudiciable.

En retenant ce scénario de conception et d'approvisionnement et en intégrant la durée des opérations de fabrication (assemblage de la bride sur la calotte, revêtement des composants et soudage des adaptateurs), Areva NP estime à 71 mois la durée nécessaire pour livrer sur site un couvercle non équipé. Le couvercle doit ensuite être équipé des mécanismes de commande de grappe, de l'instrumentation du cœur et d'un ensemble de levage intégré pour sa manutention.

Le remplacement du couvercle lors d'un arrêt de réacteur pour maintenance nécessitera selon Areva NP les opérations suivantes :

- le déshabillage du couvercle à remplacer dans le bâtiment réacteur, en parallèle de la réception du couvercle neuf et du pré-équipement de ce dernier ;
- la sortie du couvercle à remplacer du bâtiment réacteur ;
- l'introduction dans le bâtiment réacteur du couvercle neuf pré-équipé ;
- la finalisation de l'équipement du couvercle neuf et le montage sur la cuve du réacteur.

La durée de ces opérations sur site est estimée par Areva NP à 4 à 9 mois en fonction des hypothèses retenues pour l'organisation du travail (2x8h ou 3x8h sur 7 jours). En particulier cette durée peut être réduite si des mécanismes de commande de grappes (CRDM) neufs sont approvisionnés et installés sur le nouveau couvercle sur site avant introduction dans le bâtiment réacteur. Areva NP précise cependant que le nouveau couvercle ainsi équipé devra être introduit en position verticale, la faisabilité de cette opération restant à confirmer par une analyse détaillée.

En conclusion, Areva NP retient une durée totale de 75 à 80 mois pour approvisionner, fabriquer et installer un nouveau couvercle sur la cuve du réacteur EPR de Flamanville. Areva NP estime que ce scénario de remplacement serait à mener de préférence lors de la première visite décennale du réacteur.

Extraction du corps de cuve et remplacement du fond de cuve

Dans le document en référence [16], Areva NP a examiné le scénario de remplacement du fond de la cuve du réacteur EPR de Flamanville. Le fabricant a retenu comme principes de recourir à des modes opératoires connus et éprouvés, et de restituer en fin d'intervention le réacteur dans

une configuration aussi proche que possible de l'état initial. De plus, le fabricant considère que l'opération de remplacement de la calotte en elle-même ne peut se faire sur le site de Flamanville et nécessitera un transport de la cuve dans les ateliers de fabrication pour des raisons d'environnement et de disponibilité des outils.

Le scénario retenu par Areva NP conduit à désolidariser la cuve du circuit primaire, à extraire la cuve pour l'expédier dans les ateliers du fabricant, à remplacer le fond de cuve en atelier et à remettre la cuve dans le puits de cuve en la soudant au circuit primaire principal. Ce scénario a conduit à examiner les impacts sur le génie civil des bâtiments et sur les équipements sous pression nucléaires du circuit primaire principal (Figure A12).

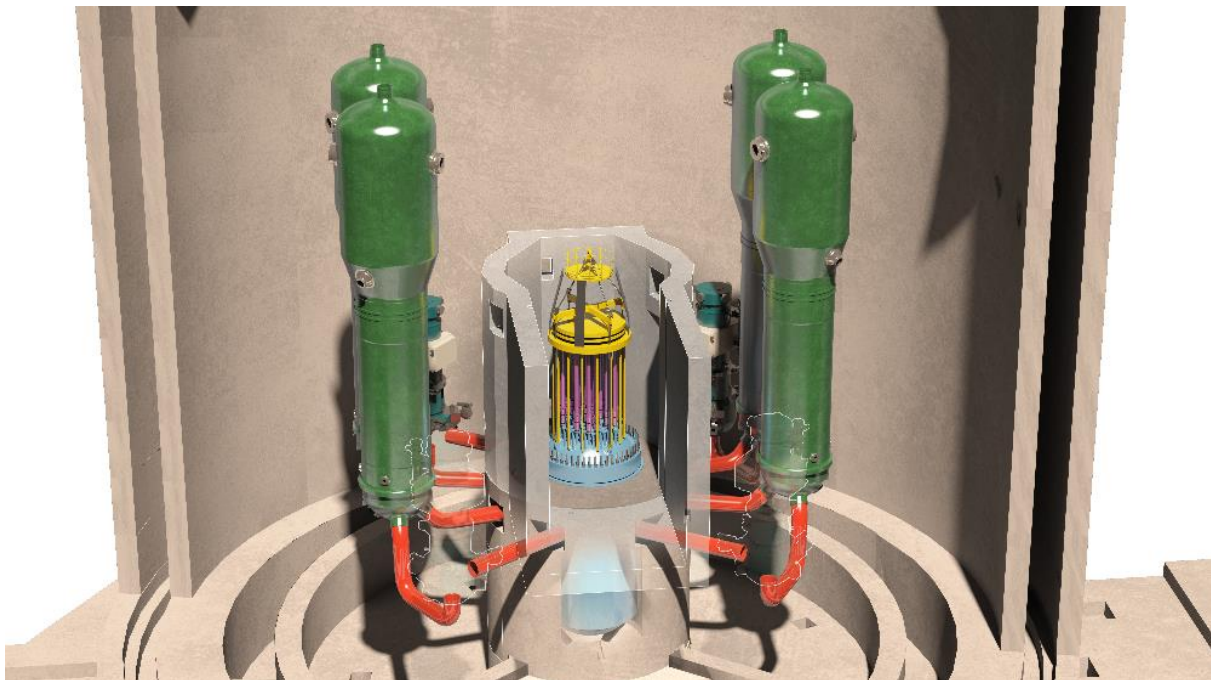


Figure A12. : La cuve dans le bâtiment réacteur

Dans la note en référence [77], EDF a fait une synthèse des principaux impacts sur le génie civil de l'extraction et la réintroduction de la cuve dans sa position initiale. Ces impacts concernent :

- des interfaces extérieures entre le portique de manutention et le local de stockage du bore ;
- la réalisation d'une ouverture depuis le portique situé à l'extérieur dans le voile ouest de la tour de manutention. Il est à noter que cette ouverture sera nécessaire en cas de remplacement des générateurs de vapeur au cours de l'exploitation ;
- la vérification que le passage libre du tampon d'accès matériel est suffisant ;
- la dépose et le stockage de voiles des casemates des générateurs de vapeur et des dalles de la piscine amovibles pour permettre l'extraction de la cuve ;
- la réinstallation de la voie de roulement pour manutentionner la cuve sur le plancher + 19,5 m ;
- la remise en configuration « introduction cuve » de la cavité du réacteur et du fond de la cavité ;
- la démolition de l'anneau limonier, opération lourde et délicate.

Areva NP indique dans le document en référence [77] que les choix effectués pour la déconstruction des ouvrages de génie civil permettent de conserver les ancrages existants et ainsi reconstruire sans nécessité de modifier la structure et à l'identique de la construction initiale. Par conséquent Areva NP considère que la qualité et la sûreté des installations sont assurées sur la séquence de génie civil.

Les opérations envisagées sur les équipements sous pression nucléaires sont la découpe des soudures entre la cuve et les tuyauteries primaires, la manutention de la cuve et son transport dans les ateliers de fabrication, le remplacement du fond de cuve en atelier, la réintroduction de la cuve et son assemblage aux tuyauteries primaires.

La découpe des soudures devra se faire au-delà des liaisons bimétalliques et conduira à un raccourcissement de 30 mm des tuyauteries primaires (perte de matière et usinage des chanfreins). Le remplacement de la calotte de fond de cuve conduira Areva NP à couper la partie inférieure de la cuve au niveau de la zone de raccordement avec les viroles cylindriques du cœur (voir Figure A13).

En parallèle de ces opérations, une nouvelle calotte et un anneau intermédiaire seront approvisionnés et seront assemblés avant d'être soudés sur la cuve. Les composants seront approvisionnés chez le forgeron JSW en respectant l'exigence de qualification technique de l'arrêté ESPN en référence [3]. En particulier, Areva NP indique que JSW saura fabriquer une calotte inférieure exempte de ségrégation majeure positive du carbone préjudiciable.

Areva NP n'a pas identifié pour ces opérations d'approvisionnement et d'assemblage en atelier de risque spécifique autre que ceux d'une fabrication standard.

L'assemblage de la cuve aux tuyauteries primaires sur site conduira le fabricant à un remplacement partiel des boucles primaires (voir Figure A14) pour compenser la perte de matière lors des opérations de découpe et avoir un recul nécessaire pour la mise en œuvre des contrôles par essais non destructifs. Cela conduira donc à rajouter quatre fois deux soudures supplémentaires sur le circuit primaire principal, ce qui introduira des contraintes supplémentaires dans les boucles. Ces contraintes sont dues au soudage lors de la fermeture du circuit primaire qui se fait sur la cuve et non sur les générateurs de vapeur, comme cela a été réalisé lors du montage initial. Cette nouvelle configuration laissera un degré moindre de liberté aux tuyauteries.

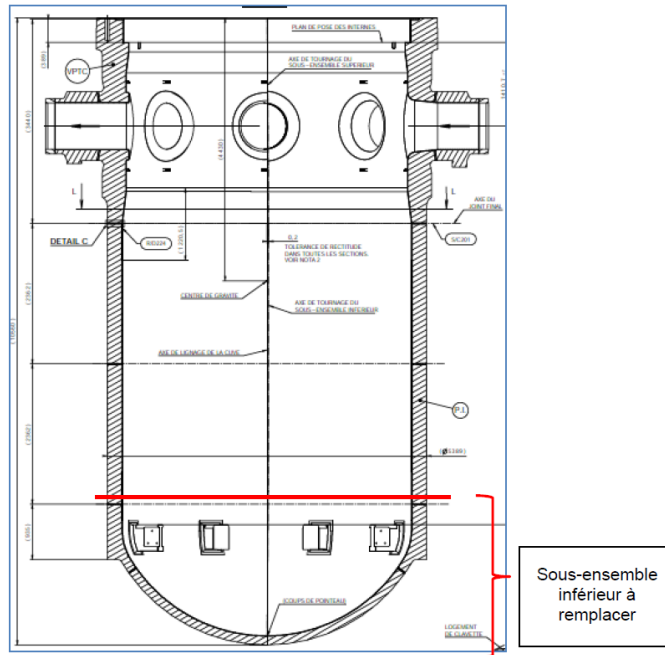


Figure A13. : Découpe de la partie inférieure de la cuve en vue du remplacement de la calotte

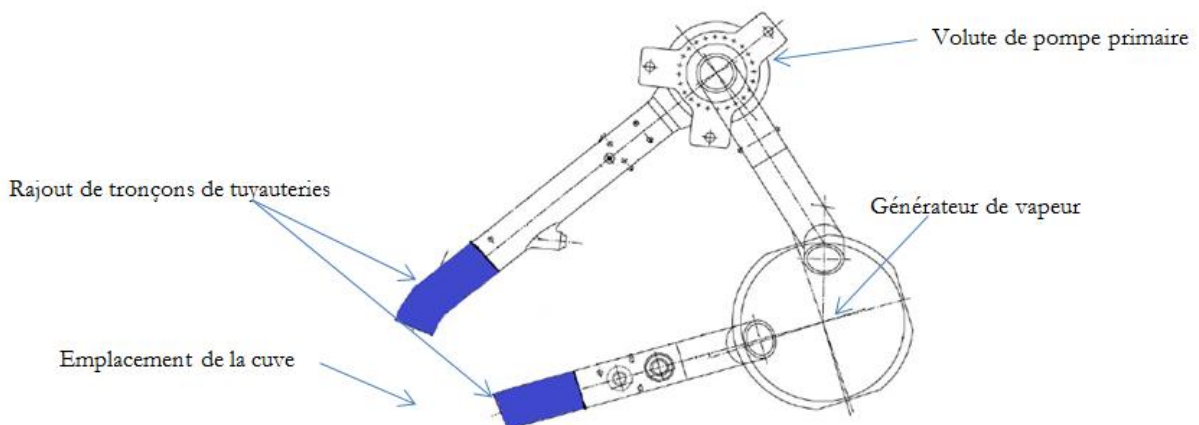


Figure A14. : Vue de dessus d'une boucle du circuit primaire permettant d'identifier les tronçons de tuyauterie à remplacer

Dans son document en référence [16], Areva NP a identifié au cours de son analyse les risques suivants :

- le risque de ne pas pouvoir maintenir les internes de cuve dans le bâtiment réacteur lors des opérations d'extraction et de remise en place de la cuve ;
- les risques liés à la modification de la chaîne de manutention avec requalification du pont polaire et remise en place des systèmes de chariots complémentaires pour basculement du composant ;
- le risque d'endommagement de la cuve lors des opérations de manutention et de transport ;
- le risque de difficulté de reprise du calage des internes inférieurs sur les guides de maintien radiaux en cas de non-respect du lignage entre le nouveau sous-ensemble inférieur ;
- les risques liés au volume important d'effluents liquides générés par les opérations sur le génie civil ;

- le risque de délais supplémentaires pour l'approvisionnement des tronçons partiels de tuyauteries primaires ;
- le risque lié à la reconstitution des tuyauteries primaires, cette opération n'ayant jamais été réalisée.

Les conséquences suivantes ont été identifiées :

- des embouts inoxydables plus courts qui rapprochent les soudures des tuyauteries des liaisons bimétalliques ce qui peut limiter les solutions de réparation pour tenir compte des exigences de contrôlabilité ;
- la partie basse de la cuve serait soumise à un traitement thermique de détensionnement local supplémentaire (joint soudé entre l'anneau et la calotte) ;
- un décalage d'environ 10 mm de la soudure entre la virole inférieure de cœur et la zone de raccordement est considéré par Areva NP comme a priori sans impact sur le programme de surveillance en service ;
- l'ajout de huit soudures supplémentaires sur le circuit primaire principal ;
- l'ajout de contraintes résiduelles supplémentaires dans les boucles primaires. Un travail de justification mécanique sera à mener.

Areva NP considère en première estimation que la durée du projet pourrait être de 86 mois.

**Annexe 8 : Gammes de forgeage des calottes inférieure et supérieure du réacteur
EPR de Flamanville**

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

Figure A15. : Gamme de forgeage des calottes supérieure et inférieure FA3

Annexe 9 : Synthèse des cartographies de teneur en carbone en surface des calottes

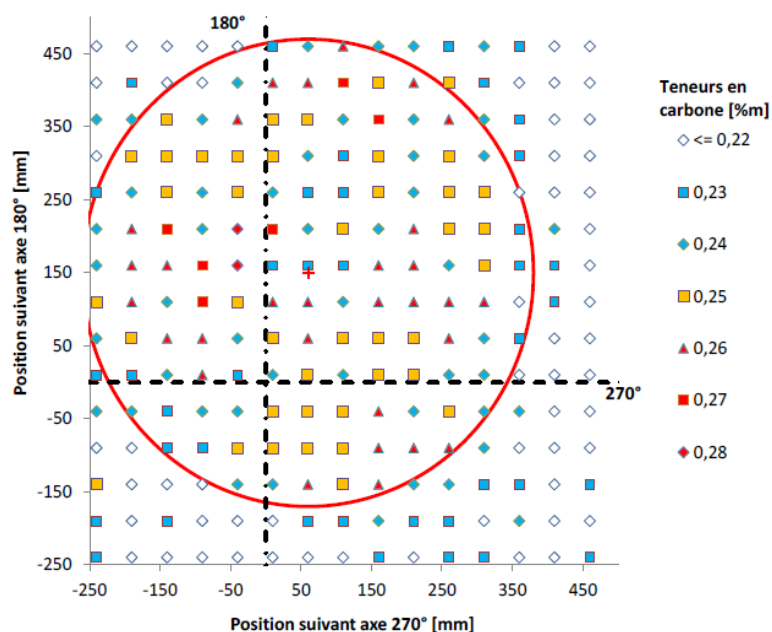


Figure A16. : Représentation de la zone la plus ségréguée sur la surface externe de la calotte supérieure UK (mesures par SEO - appareil du prestataire)
Pas de mesure : 50 mm x 50 mm

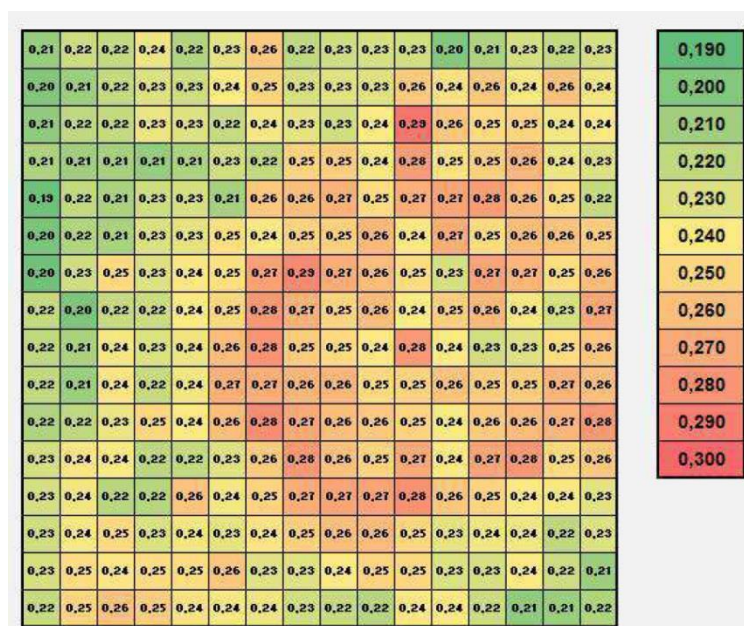


Figure A17. : Représentation de la zone la plus ségréguée sur la surface externe de la calotte supérieure UK (mesures par SEO - appareil d'Areva NP)
Pas de mesure : 50 mm x 50 mm

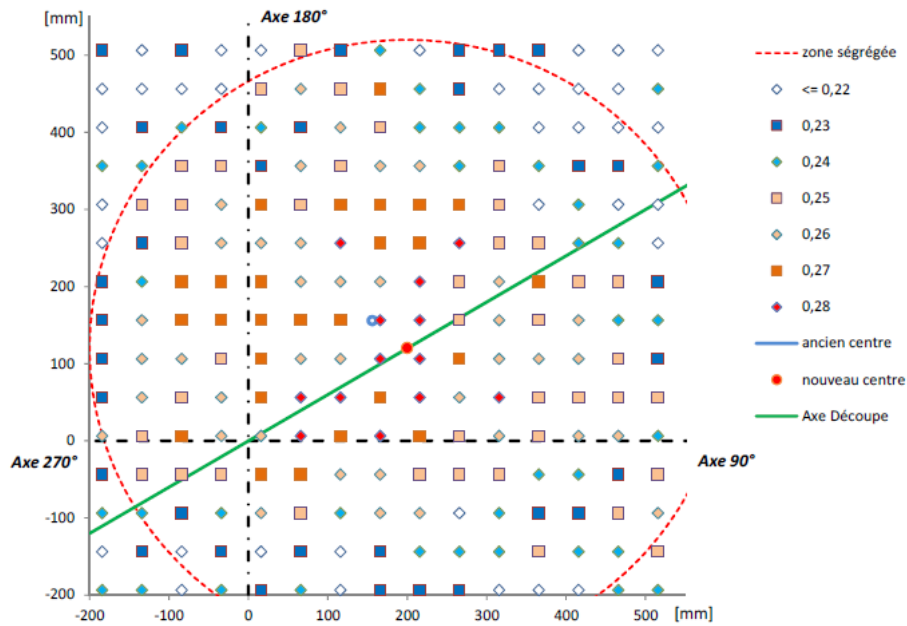


Figure A18. Représentation de la zone la plus ségrégée sur la surface externe de la calotte inférieure UA (mesures par SEO - appareil du prestataire)
Pas de mesure : 50 mm x 50 mm

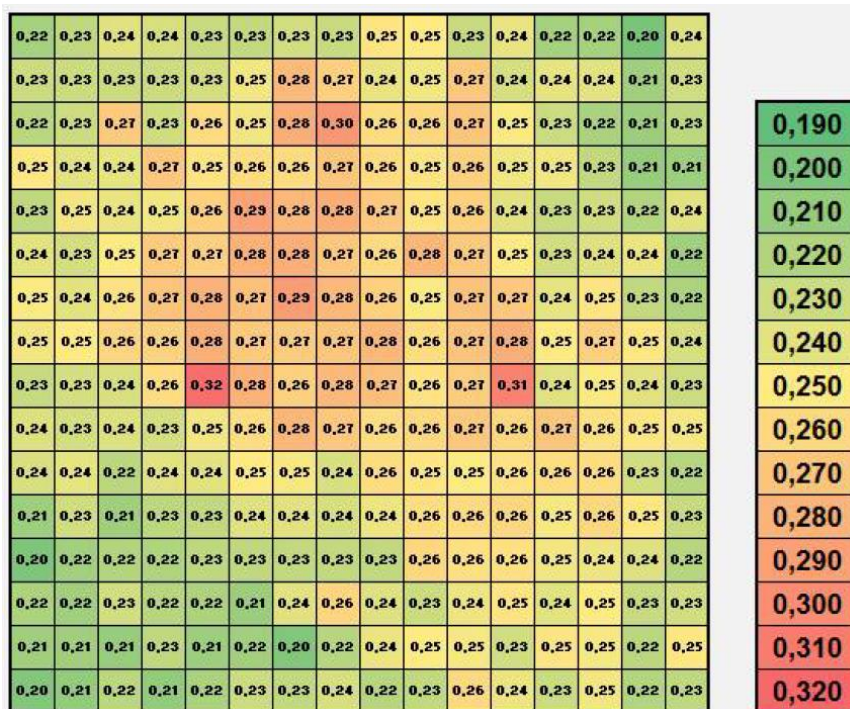


Figure A19. : Représentation de la zone la plus ségrégée sur la surface externe de la calotte inférieure UA (mesures par SEO - appareil d'Areva NP)
Pas de mesure : 50 mm x 50 mm

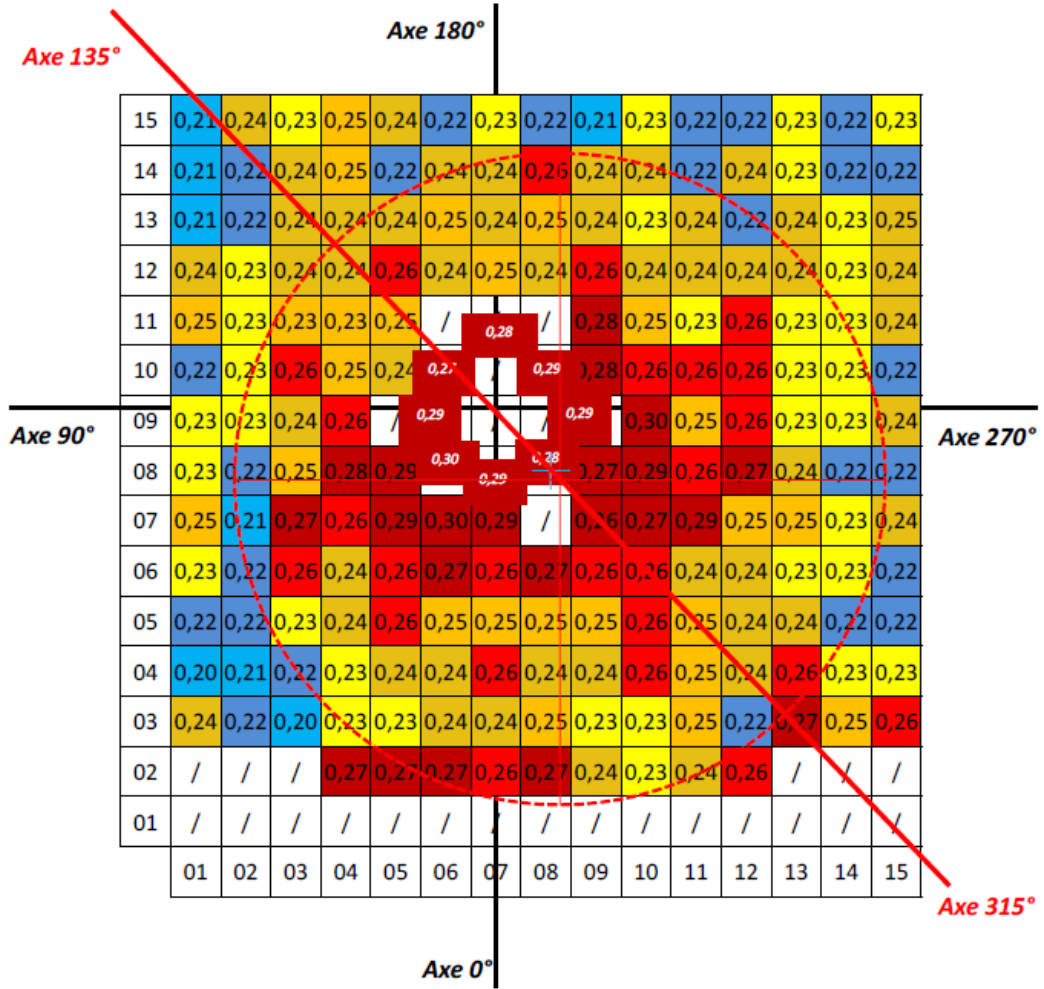


Figure A20. : Représentation de la zone la plus ségrégee sur la surface externe de la calotte supérieure UA (mesures par CIR)
 Pas de mesure : 50 mm x 50 mm

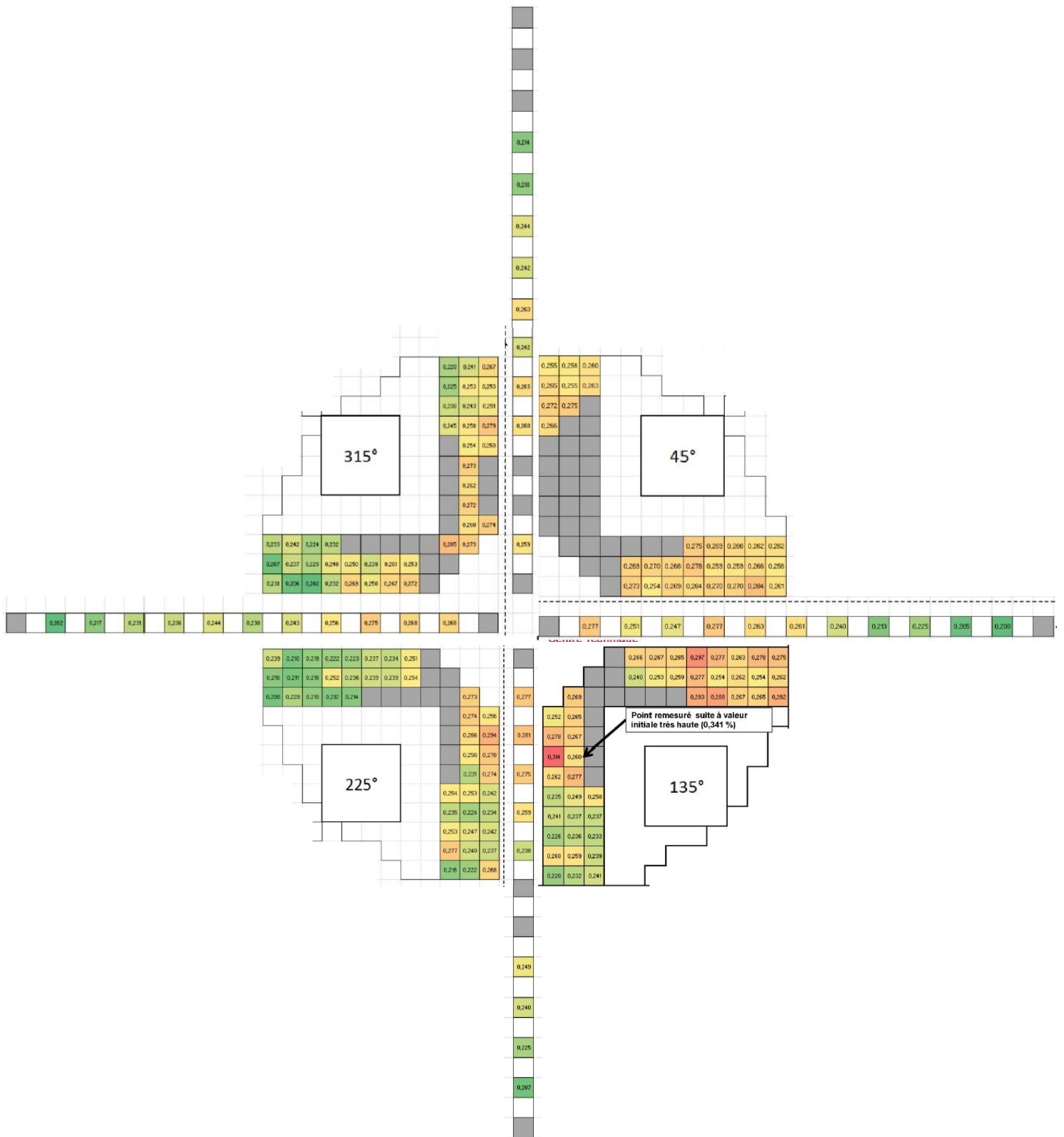


Figure A21. : Représentation de la zone la plus ségréguée sur la surface externe de la calotte supérieure FA3 (mesures par SEO - appareil d'Areva NP)
 Pas de mesure : 30 mm x 30 mm

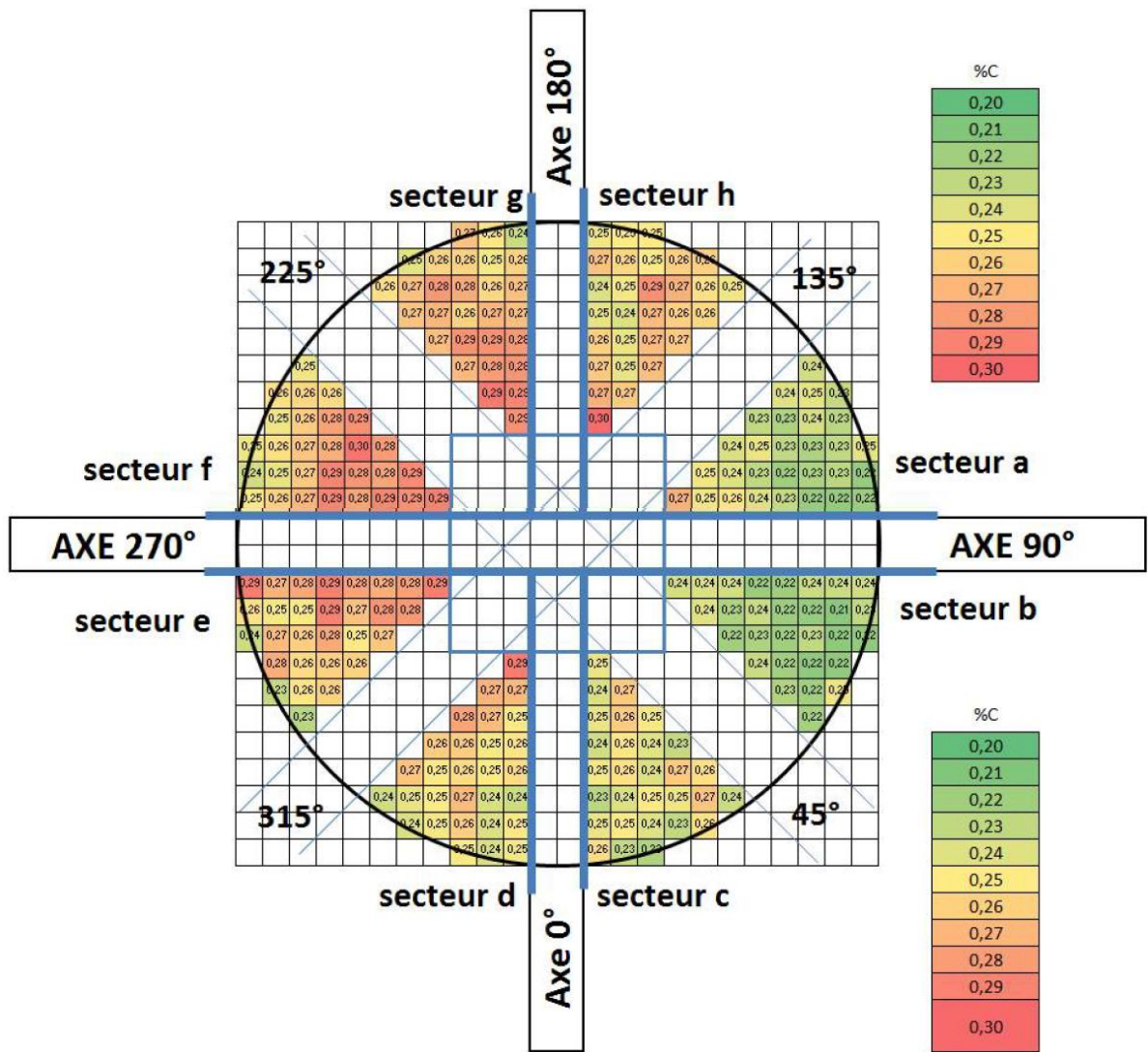


Figure A22. : Représentation de la zone la plus ségréguée sur la surface externe de la calotte inférieure FA3 (mesures par SEO - appareil d'Areva NP)
Pas de mesure : 30 mm x 30 mm

Annexe 10 : Synthèse des cartographies de teneur en carbone dans l'épaisseur

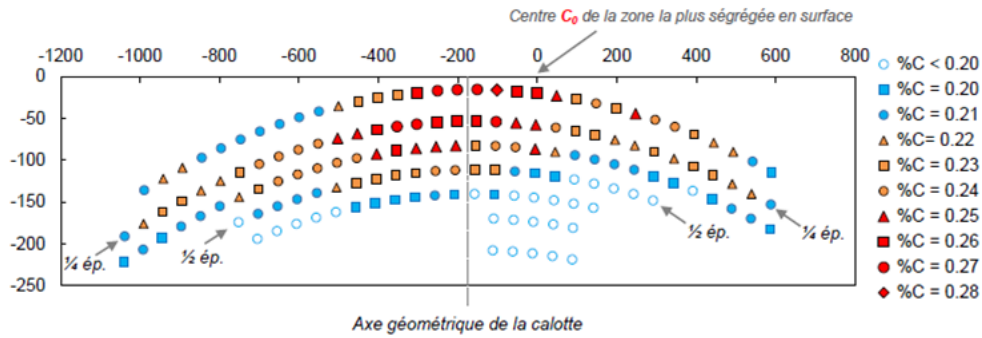


Figure A23. : Teneur en carbone dans l'épaisseur de la calotte supérieure UK (mesures par SEO – appareil du prestataire)
Pas de mesure 30 mm x 50 mm
Aucune mesure réalisée sous la mi-épaisseur

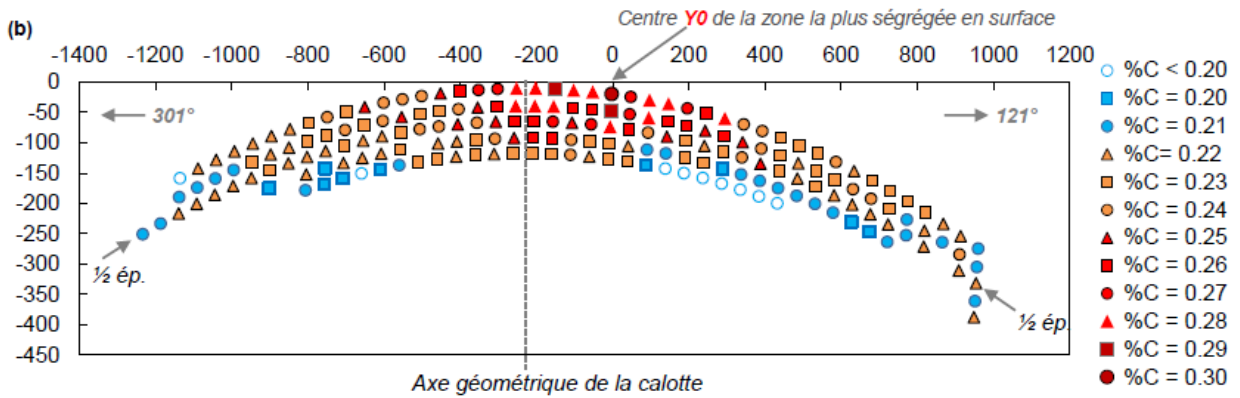


Figure A24. : Teneur en carbone dans l'épaisseur de la calotte inférieure UA (mesures par SEO – appareil du prestataire)
Pas de mesure 30 mm x 50 mm
Épaisseur totale représentée

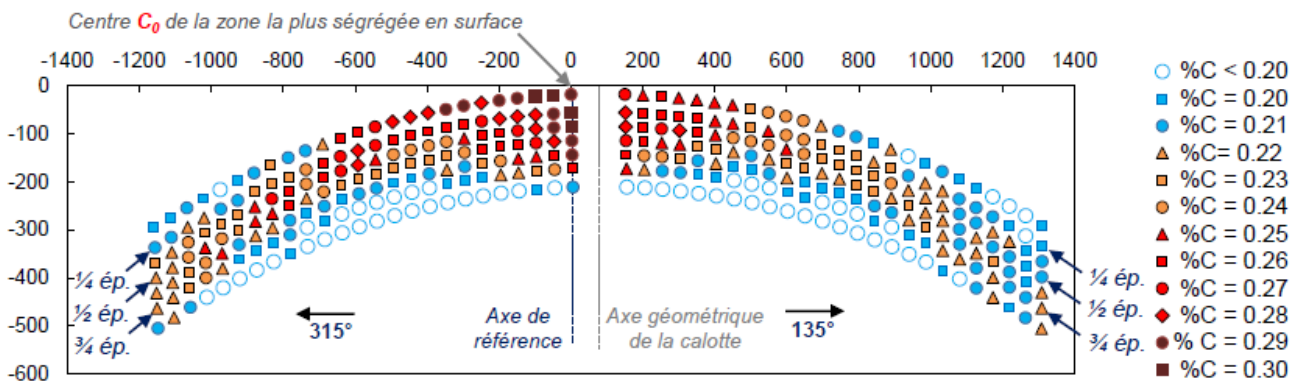


Figure A25. : Teneur en carbone dans l'épaisseur de la calotte supérieure UA (mesures par SEO – appareil du prestataire)
Pas de mesure 30 mm x 50 mm
Épaisseur totale représentée

Annexe 11 : Synthèse des cartographies de teneur en carbone par profondeur

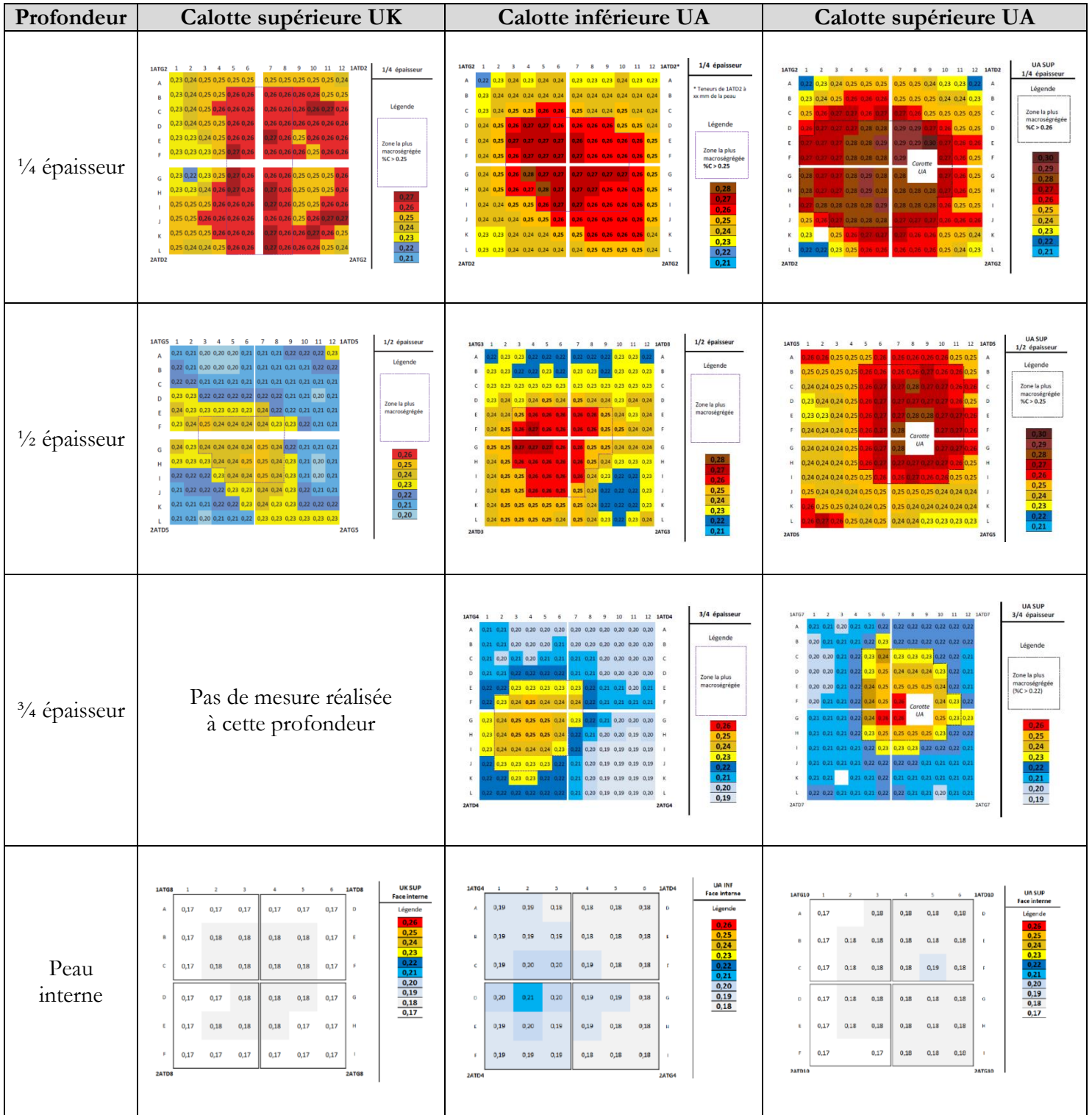


Figure A26. : Synthèse des cartographies de teneur en carbone par profondeur (mesures par CIR) Pas de mesure 80 mm x 80 mm

Annexe 12 : Liste des situations thermohydrauliques retenues dans les analyses de mécanique

Situations de choc chaud

2^e catégorie

- situation 1A1-90 : démarrage de la tranche de l'arrêt à froid à l'arrêt à chaud, après rechargement ;
- situations 20E-3P : fluctuations non programmées entre l'arrêt à chaud et l'arrêt à froid.

3^e catégorie

- situations de connexion du RIS-RA en mode RA suite à une brèche primaire (calotte inférieure uniquement) ;
- situations de reprise de la circulation naturelle suite à une brèche primaire – deux trains d'IS disponibles (calotte inférieure uniquement) ;
- situations de surpression primaire à froid (calotte supérieure uniquement).

4^e catégorie

- situation de perte totale de refroidissement par le RIS-RA en état C – variantes 1 à 4 ;
- situation de reprise de la circulation nature suite à une brèche primaire sans train IS disponible (calotte inférieure).

Situations de choc froid

2^e catégorie

- situations 20E-3P et 20A345b : fluctuations non programmées entre l'arrêt à chaud et l'arrêt à froid.

3^e catégorie

- situation 3.4 : rupture d'un tube de générateur de vapeur ;
- situation 3.5.20 : petite brèche primaire 20 cm² (2") ;
- situation 3.7 : ouverture intempestive d'une soupape de sûreté du pressuriseur.

4^e catégorie

- situations 4.3-1 et 4.3-2 : accident de perte de réfrigérant primaire (APRP) – Respectivement brèche primaire de 45 cm² et brèche primaire LEP ;
- situations 4.7 : perte de l'eau alimentaire ;
- situations 4.8 : refroidissement rapide par le secondaire ;
- situations 4.10.1 et 4.10.2 : brèche primaire avec défaillance ISMP – respectivement APRP 20 cm² et APRP 45 cm² ;
- situation accidentelle d'éjection de grappe (EDG) (calotte supérieure uniquement) ;
- situation accidentelle enveloppe des situations de surpression à froid – Scénario de brèche sur le système RIS-RA, en mode RA (calotte inférieure uniquement).

Annexe 13 : Évolution de la ténacité et du facteur d'intensité de contraintes en fonction de la température

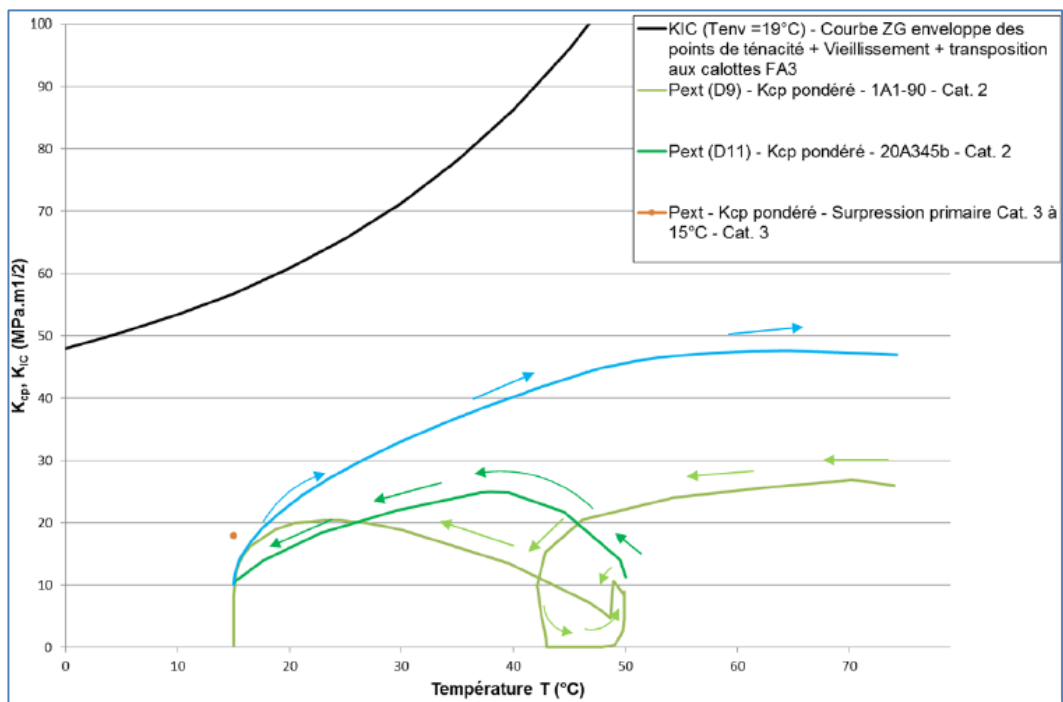


Figure A27. : Calotte supérieure – Défaut de 10 mm en peau externe – Température d'indexation de 19 °C - Évolution du facteur d'intensité de contraintes et de la ténacité en fonction de la température pour les situations dimensionnantes

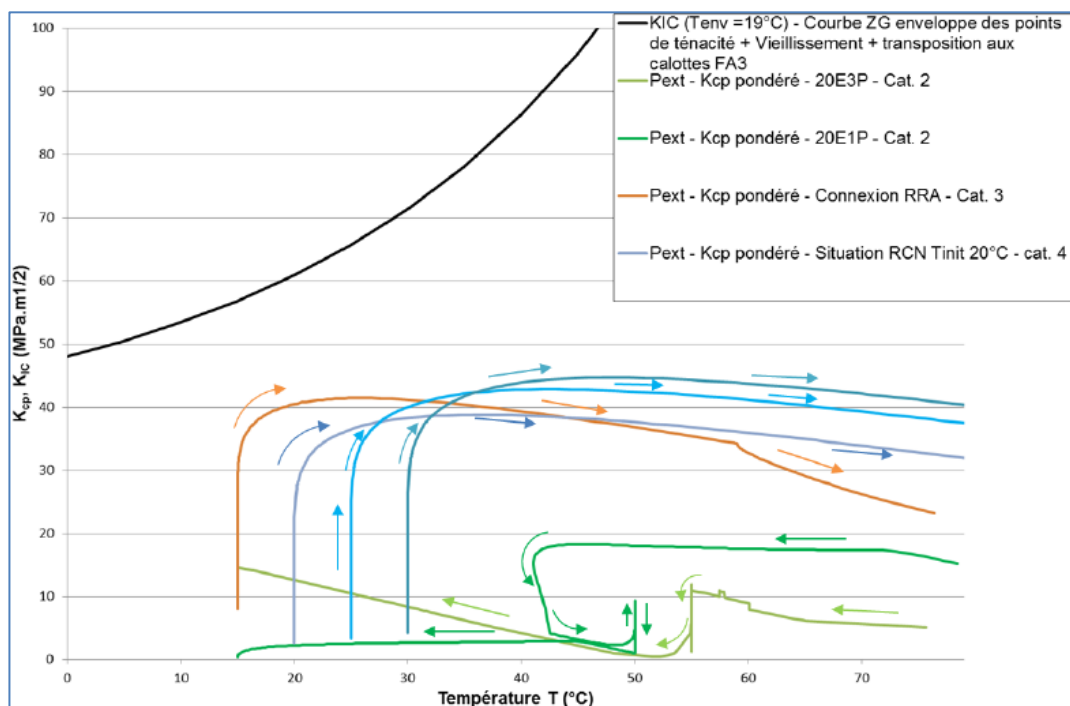


Figure A28. : Calotte inférieure – Défaut de 10 mm en peau externe - - Température d'indexation de 19 °C - Évolution du facteur d'intensité de contraintes et de la ténacité en fonction de la température pour les situations dimensionnantes

Annexe 14 : Facteurs de marge pour des décalages de RT_{NDT} de 70 °C en peau externe et 35 °C en peau interne

Catégorie	Situation	Désignation	Facteur de marge	Référence
2	DDS 20A 345b	Fluctuations entre AAC et AAF faible amplitude	1,79	[43]
3	DDS 3.6.1.a	Petite rupture de tuyauterie vapeur (RTV) sans perte totale des alimentations électriques externes (PTAEE)	4,42	[43]
	DDS 3.8.2	Surpression monophasique liée à un IS intempestif	2,55	[74]
4	Hors DDS	Perte RIS-RA en mode RA en état C	1,09	[43]

Tableau A3. : Facteurs de marge pour les transitoires de chocs chauds de la calotte supérieure étudiés, pour un défaut débouchant en peau externe et un ΔRT_{NDT} (ZS) de 70 °C

Catégorie	Situation	Désignation	Facteur de marge	Référence
2	DDS 20E-1P	Fluctuations entre AAC et AAF	2,53	[43]
3	Hors DDS	Reprise de circulation naturelle (RCN) suite à un APRP petite brèche (20cm ²) dans 2 boucles	0,92	[75]
3	Hors DDS	Connexion du RIS-RA en mode RA	0,97	[76]
4	Hors DDS	RCN dans 2 boucles	1,03	[43]

Tableau A4. : Facteurs de marge pour les transitoires de chocs chauds de la calotte inférieure étudiés, pour un défaut débouchant en peau externe et un ΔRT_{NDT} (ZS) de 70 °C

Catégorie	Situation	Désignation	Facteur de marge	Référence
2	DDS 20A345b	Fluctuations non programmées entre AAC et AAF plage basse	2,41	[51]
3	DDS 3.4 a	Rupture d'un tube de générateur de vapeur	2,51	[51]
4	Hors DDS	Éjection de grappe - Brèche de 45 cm ²	2,06	[51]

Tableau A5. : Facteurs de marge pour les transitoires de chocs froids de la calotte supérieure étudiés, pour un défaut à ¼ d'épaisseur de la paroi interne et un ΔRT_{NDT} (ZS) de 35 °C

Catégorie	Situation	Désignation	Facteur de marge	Référence
2	DDS 20E-3P	Surpression à froid monophasique	2,53	[51]
3	DDS 3.4	Rupture d'un tube de générateur de vapeur	2,19	[51]
4	DDS 4.9.2	Surpression à froid monophasique suite à une mise en service intempestive de l'injection de sécurité (IS)	3,05	[51]

Tableau A6. : Facteurs de marge pour les transitoires de chocs froids étudiés pour la calotte inférieure, pour un défaut à ¼ d'épaisseur de la paroi interne et un ΔRT_{NDT} (ZS) de 35 °C

Catégorie	Situation	Désignation	Facteur de marge	Référence
2	20A345b	Fluctuations non programmées entre AAC et AAF plage basse	2,00	[50]
3	DDS 3.4.a	Rupture d'un tube de générateur de vapeur	1,77	[50]
4	Hors DDS	Éjection de grappe – Brèche de 45 cm ²	1,49	[50]

Tableau A7. : Facteurs de marge pour les transitoires de chocs froids étudiés pour la calotte supérieure, pour un défaut débouchant en peau interne et un ΔRT_{NDT} (ZS) de 35 °C

Catégorie	Situation	Désignation	Facteur de marge	Référence
2	DDS 20 E- 3P	Fluctuations entre AAC et AAF	2,07	[50]
3	DDS 3.8.2	Surpression à froid monophasique	1,62	[50]
4	Hors DDS	Brèche RRA	1,57	[74]

Tableau A8. : Facteurs de marge pour les transitoires de chocs froids étudiés pour la calotte inférieure, pour un défaut débouchant en peau interne et un ΔRT_{NDT} (ZS) de 35 °C

Annexe 15 : Réponses d'Areva NP aux demandes de l'ASN

Lettre de l'ASN CODEP-DEP-2015-043888 du 14 décembre 2015			
N°	Demandes	Avis du rapporteur	Partie du rapport concernée
1	« L'ASN vous demande de réaliser sur le fond de cuve des essais non destructifs de surface, autres que le ressuage, complémentaires de ceux déjà réalisés dans le cadre de la fabrication pour conforter l'absence de défauts, dans une démarche de type qualification conventionnelle d'essai non destructif. »	Réponse satisfaisante, la demande a été respectée.	§3.2.2.2
2	« L'ASN vous demande de valider, au travers du programme d'essais, l'hypothèse selon laquelle les propriétés mécaniques de résilience des calottes à partir de la mi-épaisseur vers l'intérieur de la cuve sont supérieures à 60 joules à 0 °C. À défaut, l'ASN vous demande de compléter la liste des situations et le dossier de justification, en analysant notamment d'autres transitoires. »	Le programme d'essais a montré que cette hypothèse n'était pas validée. Le programme d'essais et la liste des situations étudiées ont par conséquent été adaptés. La réponse est satisfaisante.	§4.3
3	« L'ASN vous demande de démontrer au travers des résultats d'essais que le matériau présente dans le domaine ductile un comportement suffisamment ductile et tenace compatible avec les règles de conception utilisées. »	Réponse satisfaisante, la demande a été respectée.	§4.3.6
4	« L'ASN vous demande d'identifier et conserver l'ensemble de la matière (éprouvettes, chutes...) issue des calottes pour d'éventuelles investigations complémentaires. »	Les modalités de conservation finale sont en cours d'instruction.	§4.1.3.3
5	« L'ASN vous demande de préciser, avant l'engagement du programme d'essais et après la caractérisation de l'étendue de la zone ségréguée, la localisation des macrographies et micrographies. L'ASN vous demande également d'analyser les faciès de rupture des éprouvettes. »	Réponse satisfaisante, la demande a été respectée.	§4.1.2.1 §4.3.8.4
6	« L'ASN vous demande de lui présenter avant mise en œuvre le plan de prélèvement que vous envisagerez à la suite de ces cartographies chimiques. »	Réponse satisfaisante, la demande a été respectée.	§4.1.2.1
7	« L'ASN vous demande de faire réaliser les analyses chimiques par un laboratoire accrédité selon la norme NF EN ISO 17025. »	Réponse satisfaisante, la demande a été respectée.	§4.1.2.2
8	« L'ASN vous demande de faire réaliser une partie des essais mécaniques, à l'exception des essais Pellini, par un laboratoire accrédité selon la norme NF EN ISO 17025 indépendant du groupe Areva NP. »	Réponse satisfaisante, la demande a été respectée.	§4.1.2.1
9	« L'ASN vous demande que la démarche permette d'apprécier : - le caractère enveloppe de la courbe ZG6110 du RCC-M indexée sur la RT_{NDT} de fin de vie retenue à la conception diminuée du décalage lié au vieillissement thermique et sous déformation ainsi que de la différence maximale entre la RT_{NDT} de recette des calottes de Flamanville 3 et celle de chacune des deux calottes sacrificielles vis-à-vis des valeurs de ténacité mesurées ; - la cohérence de la T_{NDT} locale avec la valeur retenue à la conception. »	Réponse satisfaisante, la demande a été respectée. Areva NP a apporté des éléments d'appréciation quant au fait que la T_{NDT} locale est supérieure à la valeur retenue à la conception.	§4.3.8
10	« L'ASN vous demande de déterminer : - la température d'indexation permettant d'envelopper les mesures de ténacité en zone ségréguée ; - la température d'indexation résultant des essais Pellini en zone ségréguée ; - la température d'indexation résultant des essais Charpy en zone ségréguée, dans le cas où la RT_{NDT} locale ne serait pas égale à la T_{NDT} locale. L'ASN vous demande, le cas échéant, de fournir des éléments d'interprétation de la différence entre la T_{NDT} locale et la RT_{NDT} locale. »	Réponse satisfaisante, la demande a été respectée.	§4.3.8
11	« L'ASN vous demande de vérifier que la température d'indexation permettant d'envelopper les mesures de ténacité en zone ségréguée est inférieure aux deux autres températures d'indexation mentionnées à la demande n° 10. »	Réponse satisfaisante, la demande a été respectée.	§4.3.8
12	« L'ASN vous demande de vérifier que les températures d'indexation déterminées par le programme d'essais restent inférieures à la température d'indexation maximale admissible qui résulte des analyses de mécanique à la rupture. »	Réponse satisfaisante, la demande a été respectée.	§6
13	« L'ASN vous demande de proposer des mesures renforcées de contrôle de mise en service, d'exploitation et de suivi en service adaptées à la situation rencontrée et les reporter dans la notice d'instruction de l'équipement. »	Ce point fait l'objet de positions du rapporteur.	§8

14	« L'ASN vous demande de réaliser, en lien avec l'exploitant, une étude technique des scénarios d'extraction du corps de cuve du puits du bâtiment réacteur et de remplacement de la calotte du fond de la cuve. Cette étude devra analyser les avantages et inconvénients pour la qualité de réalisation et la sûreté de l'installation. »	La demande a été respectée.	Annexe 7
15	« L'ASN vous demande, sans préjuger des résultats de la campagne d'essais mécaniques à venir, d'étudier dès à présent la fabrication d'un nouveau couvercle de cuve en tenant compte du retour d'expérience en matière de conception et de fabrication de l'actuel. »	Areva NP a apporté des éléments sur les grandes orientations qui seraient retenues en cas de remplacement du couvercle.	Annexe 7
Lettre de l'ASN CODEP-DEP-2016-031435 du 26 septembre 2016			
N°	Demandes	Avis du rapporteur	
1	« [L'ASN] vous demande d'étudier, en complément au défaut hypothétique aux trois quarts de l'épaisseur, un défaut hypothétique sous le revêtement. »	Réponse satisfaisante, la demande a été respectée.	§6.6.3
	« [L'ASN] considère qu'en fonction des valeurs de RT _{NDT} qui seront déterminées en zone ségréguée, le conservatisme des analyses mécaniques pour les situations de quatrième catégorie devra être renforcé. »	Réponse satisfaisante, la demande a été respectée.	§6.6.1
2	« [L'ASN] vous demande de mettre en œuvre des contrôles par essais non destructifs de recherche de défauts sous le revêtement en peau interne de la calotte inférieure de la cuve du réacteur EPR de Flamanville. »	Réponse satisfaisante, la demande a été respectée.	§3.2.2.1
	« À ce titre, [L'ASN] note votre engagement de mettre en œuvre le protocole d'expertise [proposé], sur des éprouvettes de ténacité et de résilience sélectionnées et selon des critères précis. »	Réponse satisfaisante, la demande a été respectée.	§4.3.7
Courrier d'Areva NP ARV-DEP-00354 du 11 septembre 2015			
N°	Engagements	Avis du rapporteur	
1	« Areva NP s'engage à : <ul style="list-style-type: none"> - 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 épreuve depuis le précédent contrôle magnétoscopique. » 	Réponse satisfaisante, l'engagement a été respecté.	§3.2.1
2	« Pour le dossier de justification de la ténacité suffisante Areva NP prendra en compte le défaut de 10 mm et s'engage à compléter la documentation par des évaluations, au titre d'étude de sensibilités, avec un défaut de 20 mm. »	Réponse satisfaisante, l'engagement a été respecté.	§6.5
3	« Areva NP 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 RCCM, à : <ul style="list-style-type: none"> - considérer les propriétés mécaniques de début de vie pour l'épreuve initiale (pas de vieillissement) et fin de vie pour les épreuves de requalification ; - fixer une température d'épreuve raisonnablement industrielle ; - déterminer le défaut vérifiant strictement les critères du code RCC-M ; - comparer celui-ci au défaut en limite de détection. » 	L'engagement a été respecté pour l'épreuve hydraulique en usine. L'engagement est toujours valable pour les épreuves sur site.	-
4	« Areva NP et EDF s'engagent à fournir un dossier plus complet justifiant de la non pertinence d'un programme de vieillissement [...]. »	Réponse satisfaisante, la demande a été respectée.	§4.1.2.4
5	« Areva NP s'engage à réaliser la caractérisation chimique sur la calotte inférieure UA suivant le même programme que celui qui sera réalisé sur la calotte supérieure sacrificielle UK. De manière complémentaire à cette chimie, Areva NP s'engage à réaliser un programme complet d'essais mécaniques identique à celui qui sera réalisé sur la calotte supérieure sacrificielle UK. »	Réponse satisfaisante, l'engagement a été respecté.	§4.1.2.1
6	« Afin que toutes les caractéristiques et en particulier la RT _{NDT} , soient obtenues avec la même valeur de référence, pour ce qui concerne les traitements thermiques de détentionnement, Areva NP s'engage à réaliser l'ensemble des essais du programme de qualification sur des	Réponse satisfaisante, l'engagement a été respecté.	§4.1.2.1

	épreuves qui auront subi le traitement de détentionnement requis dans les spécifications d'approvisionnement. »		
7	« Areva NP réalisera des essais de ténacité dans le domaine ductile et la vérification de la suffisance de la ténacité obtenue. Areva NP précise que les règles de conception et de fabrication usuellement mises en œuvre pour les appareils sous pression nécessitent un matériau présentant une ductilité suffisante : Areva NP s'engage à respecter comme valeur minimale pour l'allongement à rupture la valeur de 14 % requise par le Décret DESP pour la zone macroségrégée des calottes FA3. »	Réponse satisfaisante, l'engagement a été respecté.	§4.3
8	« Comme indiqué dans le programme d'essais PFCSGN/NCR0002, Areva NP s'engage à traiter les incertitudes de mesure conformément aux exigences de chaque norme d'essai utilisée. Ces incertitudes de mesure sont quantifiées pour les essais de traction, de ténacité et de résilience. Areva NP s'engage à présenter les procédures de mise en œuvre des essais Pellini qui permettent de justifier la bonne maîtrise de l'essai. Pour les mesures de chimie, il est généralement admis que la méthode de combustion des copeaux permet de quantifier la composition d'un échantillon à quelques millièmes de pourcent près. - Areva NP s'engage à rédiger un protocole spécifique d'évaluation de cette incertitude. - Areva NP s'engage à ce que la préparation des éprouvettes et la réalisation des analyses chimiques et des essais Pellini soient faites sous la surveillance de Bureau Veritas Exploitation qui agira, sous un mandat qui sera délivré par ASN-DEP. BV surveillera le respect des méthodes de prélèvement et de préparation des éprouvettes, en particulier pour les éprouvettes Pellini et les méthodes d'essais, qui seront décrites dans les procédures particulières d'Areva NP. Il sera également porté attention au respect des paramètres chiffrés de ces procédures et plus particulièrement pour les essais Pellini. »	Réponse satisfaisante, l'engagement a été respecté.	§4.1.3 et 4.1.2.3
9	« Areva NP s'engage à réaliser une analyse d'impact de l'évolution des normes sur les résultats d'essais, entre les normes applicables au projet FA3 et celles qui seront utilisées pour le programme d'essais. »	Réponse satisfaisante, l'engagement a été respecté.	§4.1.3

Tableau A9. : Demandes des lettres de position de l'ASN [7] et [10] et engagements Areva NP [26]